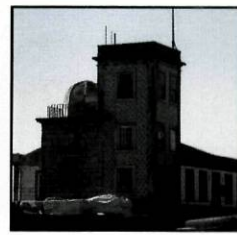
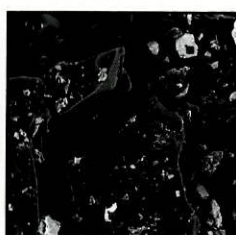


José Manuel Vilela Lobo

**DIAGNÓSTICO DA DETERIORAÇÃO DO GRANITO NO FAROL DE
SÃO MIGUEL-O-ANJO (FOZ DO DOURO - PORTO)
E MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO**

**Tese submetida à Faculdade de Ciências da
Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em
Geomateriais e Recursos Geológicos**



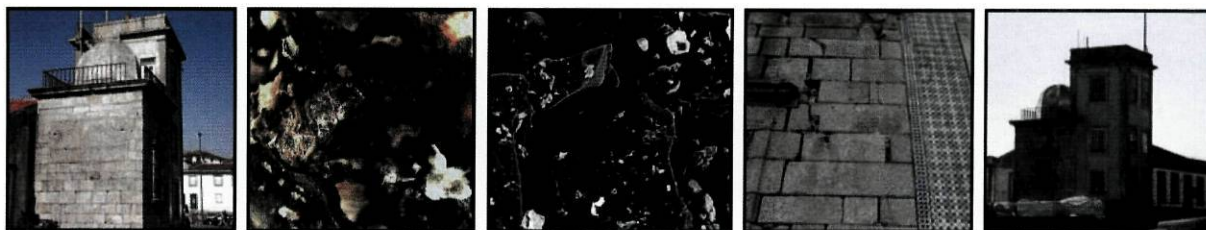
**Departamento de Geologia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
DEZEMBRO 2008**

Manoel P. Chaves
Nave Angelo de Carvalho Fernandes Almeida

José Manuel Vilela Lobo

DIAGNÓSTICO DA DETERIORAÇÃO DO GRANITO NO FAROL DE SÃO
MIGUEL-O-ANJO (FOZ DO DOURO - PORTO)
E MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO

*Tese submetida à Faculdade de Ciências da
Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em
Geomateriais e Recursos Geológicos sob orientação científica da
Professora Doutora Maria Ângela de Carvalho Fernandes Almeida,
Professora Auxiliar, do Departamento de Geologia da
Faculdade Ciências da Universidade do Porto.*



Departamento de Geologia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

DEZEMBRO 2008

Faculdade de Ciências Departamento de Geologia
BIBLIOTECA
Sala: 107
N.º: 2535
Cota: 552.32 (469.43) (043.2) / 103.1/2
Universidade do Porto

Dissertação de Mestrado em Geomateriais e Recursos Geológicos apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

O Júri da Prova de Mestrado em Geomateriais e Recursos Geológicos do Licenciado José Manul Vilela Lobo, nomeado pelo Director da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Professor Doutor Baltazar Manuel Romão de Castro é:

Presidente – Maria Manuela Coelho Marques, Professora Doutora Associada do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto;

Vogais – Maria Ângela de Carvalho Fernandes Almeida, Professora Doutora Auxiliar do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto;

Carlos Alberto Simões Alves, Professor Auxiliar na Universidade do Minho.

O trabalho experimental das amostras de granito do Farol de S. Miguel-o-Anjo da Foz do Douro, foi realizado no Laboratorium do Visionarium – Centro de Ciências do Europarque, nos laboratórios de Ensaio Raman e Difraccção de Raio X (DRX) do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, e as observações por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM e CryoSEM) e Difraccção de Raios X (DRX) no laboratório do Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP).

AGRADECIMENTOS

Começo este estudo expressando o meu reconhecimento a todas as pessoas e instituições que colaboraram e tornaram possível esta dissertação.

À Professora Doutora Maria Ângela de Carvalho Fernandes Almeida enquanto orientadora científica. Pelos ensinamentos e críticas em muitos dos momentos. Pela correcção com o pormenor e paciência que a caracterizam, para além da disponibilidade e esclarecimentos prestados, esteve sempre presente durante o acompanhamento de orientação, contribuindo com a sua amizade e interesse.

Ao Professor Doutor Carlos Soares, Presidente do Visionarium – Centro de Ciência do Europarque, pela articulação de horário no Visionarium compatível com o trabalho de Mestrado, e pela sua amizade e interesse.

Ao Visionarium – Centro de Ciência do Europarque, pela amável cedência do Laboratorium para realizar as observações das amostras ao Microscópio estereoscópico binocular.

Ao Professor Doutor Iuliu Bobos do Departamento de Geologia da FCUP, pela disponibilidade e competência demonstrada na realização dos ensaios de Difracção de Raio X.

À Professora Doutora Alexandra Guedes do Departamento de Geologia da FCUP, pela disponibilidade e competência demonstrada na realização dos ensaios de espectroscopia de Raman.

À Arquitecta Maria Ângela Melo Coordenadora da intervenção, Direcção de Serviços dos Bens Culturais – Porto, no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro, pela disponibilidade demonstrada em acompanhar a investigação, sempre que foi necessário ir ao interior do monumento.

O meu agradecimento a todas as pessoas que no cumprimento das suas funções profissionais prestaram a sua ajuda de forma simpática e profissional, em particular à Dr.^a Daniela Silva do CEMUP e aos profissionais da Direcção de Serviços dos Bens Culturais – Porto e do Departamento de Geologia da FCUP.

Por último, mas não em último lugar, desejo expressar o meu sincero agradecimento à minha mulher, às minhas irmãs, à minha mãe, e aos meus amigos, cujo apoio constante foi imprescindível para levar a bom porto este trabalho. Bem hajam!

RESUMO

O Farol de São Miguel-o-Anjo na Foz do Douro é o mais antigo farol existente em Portugal. Foi o bispo de Viseu, D. Miguel da Silva, quem mandou edificar o farol-ermida de S. Miguel-o-Anjo, no sítio da Cantareira sobre um rochedo desigual e escarpado, quase a meio do rio Douro. Com planta interior octogonal, exteriormente é quadrangular e pretendia-se com tal disposição e ordem ser uma luz que iluminasse a entrada do porto, para poder guiar no bom caminho barcos e naus que ao rio Douro aportassem, avisando de quanto era perigoso o penhasco existente à entrada da barra, chamado de Felgueira. Foi construído em 1527, sob desenho de Francesco de Cremona. Tem três inscrições contemporâneas da sua fundação. A sua cúpula tem uma pureza arquitectónica renascentista. Trata-se de um exemplar único no país e dos mais antigos da Europa. É um edifício emblemático pelos valores históricos a si associados e pelas patologias que apresenta.

O objectivo desta tese de dissertação prende-se com a aplicação de técnicas e a realização de ensaios diagnósticos que permitam determinar os agentes e os mecanismos responsáveis pela degradação do granito até uma altura de 2,50 metros nas fachadas Sul e Nascente, e avançar com uma proposta de intervenção de conservação dessas fachadas até essa altura de 2,50 metros, do Farol de São Miguel-o-Anjo na Foz do Douro. Recorreu-se a intenso trabalho de pesquisa bibliográfica para possibilitar o apoio à investigação efectuada no que diz respeito ao conhecimento das estratégias de estudo de problemas actuais nas rochas utilizadas na construção de monumentos e edifícios. Foi importante conhecer a identidade histórica e funcional do Farol de S. Miguel-o-Anjo, bem como aspectos da geomorfologia e do clima no enquadramento do monumento do contexto geológico.

Estabeleceram-se os principais processos de deterioração com base no estudo do granito representativo do Farol de S. Miguel-o-Anjo. Para o efeito fez-se o levantamento cartográfico das litologias e das deteriorações em sectores mais degradados e o estudo mineralógico e geoquímico do granito usado na construção recorrendo-se a diversas técnicas experimentais, designadamente microscopia estereoscópica binocular, difracção dos raios X, microscopia electrónica de varrimento e espectroscopia de efeito Raman.

Os resultados obtidos permitiram concluir que este monumento foi construído preferencialmente com granito do Porto. Que o aumento da poluição atmosférica associado a sua função, e às condições atmosféricas, assim como a sua localização e ainda à ascensão por capilaridade de soluções minerais de sais solúveis nas paredes, e ausência de argamassas nas juntas da Fachada Nascente (Este), têm vindo a contribuir para o aumento substancial da velocidade de deterioração da pedra do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro.

ABSTRACT

The lighthouse of St Michael the Angel in Foz do Douro, Porto, is the oldest existing lighthouse in Portugal. It was the Bishop of Viseu, D. Miguel da Silva, who ordered the construction of the lighthouse-chapel of St. Michael the Angel, on the site of Cantareira, on an uneven rock cliff almost in the middle of the Douro river. With an inner octagonal drawing, it has a square exterior shape that constitute an arrangement and order meant to be a light that illuminates the entrance of the harbour, so that it could be a guide for ships and boats to follow the right track to the Douro river shores, warning how dangerous the existing cliff into the bar, called Felgueira, was. The lighthouse-chapel was built in 1527, under a design by the Italian Francesco de Carmona. It has three entries, contemporary of its foundation. The dome exhibits a purity of Renaissance architecture. It constitutes a single copy in Portugal and the oldest in Europe. It is an emblematic building due to the historical features and also to the stone diseases associated to it.

The aim of this thesis deals with the application of techniques and diagnostic tests to determine the factors and the mechanisms responsible for the deterioration of the granite stones applied in the building, up to a height of 2.50 meters, both on the South and East façades, and proceeds with an offer of assistance for the conservation of these façades up to the same height. A hard work of bibliographic research has been carried out to provide support for investigation regarding the knowledge of the strategies for the study of problems existing in the rocks used in the construction of monuments and buildings. It was important to know the identity and the historical performance of the Lighthouse of St. Michael the Angel, as well as aspects of geomorphology and climate in the framework of the monument within the geological context.

The recognition of the main deterioration processes was based on the study of the representative granite facies of the Lighthouse of St. Michael the Angel. For this purpose a mapping of survey of the spoilage in lithology and of the most degraded areas was done, as well as a mineralogical and geochemical study of the granite used in the construction by reference to various experimental techniques, including stereoscopic binocular microscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy and the Raman spectroscopy.

The results indicate that this monument was preferentially built with the two-mica granite of Oporto region. The increased air pollution associated with its function, the weathering processes, the climate, the monument location, the rise of mineral solutions of soluble salts on the walls by capillarity and the absence of mortar in the joints of the eastern façade have contributed for the substantial increase in the rate of stone deterioration of the Lighthouse of St. Michael the Angel in Foz do Douro.

RÉSUMÉ

Le phare de St. Michel de l'Ange à Foz do Douro est le plus ancien phare au Portugal. Il a été l'évêque de Viseu, D. Miguel da Silva, qui a construit le phare de la chapelle Saint - Michel l'Ange, sur le site de Cantareira sur une falaise de roche de façon inégale, presque au milieu du fleuve Douro. Avec plante octogonale à l'intérieur, l'extérieur est carré et avec son arrangement et ordre il est une lumière qui éclaire l'entrée du port, de sorte que on puisse conduire sur la bonne voie navires et bateaux qui au fleuve Douro amarraient, en informant combien était dangereuse la falaise existante à l'entrée de la barre, appelée de Felgueira. Il a été construit en 1527, en vertu de la conception de Francesco de Cremona. Il a trois entrées contemporaines de sa fondation. La coupole a une pureté de l'architecture renaissance. Il est un exemplaire unique dans le pays et le plus ancien d'Europe. Il est un bâtiment emblématique par les valeurs historiques et les maladies y liées.

L'objectif de cette thèse porte sur l'application de techniques et de mener des tests de diagnostic permettant de déterminer les joueurs et les mécanismes responsables de la détérioration de le granite jusqu'à une hauteur de 2,50 mètres sur les façades Sud et Est, et procéder à une offre d'assistance pour la conservation de ces façades jusqu'à l'hauteur de 2,50 mètres.

On a fait un intense travail de recherche sur de littérature afin de fournir un appui aux recherches effectuées en ce qui concerne la connaissance des stratégies d'étude des problèmes existants dans les roches utilisées pour la construction de monuments et de bâtiments. Il est important de connaître l'identité et l'histoire des performances du phare de Saint Michel l'Ange, ainsi que des aspects de la géomorphologie et du climat dans le cadre du monument du contexte géologique.

On a fait des études sur les principaux processus de dégradation basé sur l'étude du granite représentant du phare de Saint Michel l'Ange. À ce fin, on a fait l'étude cartographique de la détérioration de la lithologie de la plupart des zones dégradées et l'étude minéralogique et géochimique du granite utilisé dans la construction en faisant référence à différentes techniques expérimentales, y compris microscope binoculaire stéréoscopique, la diffraction des rayons X, microscopie électronique de balayage et spectroscopie Raman.

Les résultats ont indiqué que ce monument a été construit de préférence avec du granite de Porto. Que l'augmentation de la pollution de l'air lié à son travail, et les intempéries, ainsi que son emplacement et même l'augmentation par capillarité de solutions minéraux de sels solubles sur les murs, et pas de mortier dans les joints à la façade Est, doivent avoir contribué à l'augmentation substantielle du taux de détérioration de la pierre du phare Saint-Michel l'Ange à Foz do Douro

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
RÉSUMÉ	VI
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE QUADROS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
INTRODUÇÃO GERAL / ESTADO ACTUAL ARTE	1
1. INTRODUÇÃO	9
1.1 A Geologia do Porto	9
1.1.1 Rochas Ígneas	11
1.1.2 Rochas Metamórficas	13
1.1.3 Rochas Sedimentares	14
1.2 Geomorfologia do Porto	15
1.3 Tectónica e Sismicidade da cidade do Porto	16
1.4 Classificação petrográfica e química	17
1.5 Meteorização	20
1.5.1 Meteorização Química	21
1.5.2 Meteorização Física	23
1.5.3 Meteorização Físico-Química	23
1.6 O Granito e a sua susceptibilidade às agressões	24
2. AMOSTRAGEM E METODOLOGIA	26
2.1 Amostragem	26
2.2 Metodologia	26
2.2.1 Microscópio estereoscópico binocular	28
2.2.2 Difracção dos raios X – DRX	28
2.2.3 Microscopia electrónica de varrimento (SEM)	29
2.2.4 Microscopia electrónica de varrimento a baixa temperatura – CryoSEM	31
2.2.5 Espectroscopia de efeito Raman	31
3. DIAGNÓSTICO DA DETERIORAÇÃO DO GRANITO	33
3.1 Introdução	33
3.2 Farol de S. Miguel-o-Anjo	34
3.2.1 Introdução	34
3.2.1.1 Intervenções no Farol de S. Miguel-o-Anjo	38
3.2.2 Amostragem	39
3.2.3 Descrição macroscópica das patologias	41
3.2.3.1 Patologias (origem física / mecânica)	42
3.2.3.1.1 Desagregação granular	42
3.2.3.1.2 Falta / Junta Aberta	44
3.2.3.2 Patologias (origem química)	45
3.2.3.2.1 Crostas Negras	45
3.2.3.2.2 Filmes negros	47
3.2.3.2.3 Alteração cromática	49
3.2.3.2.4 Plaquetas	50

3.2.3.3 Patologias (origem biológica).....	51
3.2.3.3.1 Colonização Biológica.....	53
3.2.3.3.2 Outros agentes biológicos.....	57
3.2.4 Cartografia e localização das principais deteriorações.....	58
3.2.4.1 Localização das principais deteriorações.....	63
3.2.4.1.1 Fachada Sul.....	65
3.2.4.1.1 Fachada Nascente.....	66
3.2.5 Estudo petrográfico das patologias.....	66
3.2.5.1. Desagregação Granular.....	66
3.2.5.2 Plaqueta.....	68
3.2.5.3 Alteração Cromática (Mancha).....	69
3.2.5.4 Crostas Negras.....	70
3.2.5.5 Filmes Negros.....	72
3.2.5.6 Película Verde.....	74
3.2.5.7 Outras análises na espectroscopia de efeito Raman.....	76
3.2.6 Estudo mineralógico das deteriorações.....	77
3.2.7 Estudo das argamassas.....	82
3.3 Minerais de sais solúveis identificados pelo DRX e pelo Cryo-SEM/EDS.....	84
3.4 Conclusões.....	84
4. IMPACTE DA POLUIÇÃO AMBIENTAL.....	86
4.1 Introdução.....	86
4.2 Qualidade do ar na Foz do Douro no Porto.....	88
4.3 Acção das águas das chuvas.....	90
4.4 Acção do aerossol marinho.....	92
4.5 Acção das Aves.....	93
4.6 Variações climáticas em Portugal.....	94
5. MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO DO GRANITO DO FAROL DE S. MIGUEL-O-ANJO.....	98
5.1 Introdução.....	98
5.2 Eliminação de agentes causadores de degradação da pedra.....	99
5.2.1 Eliminação da colonização biológica.....	100
5.2.2 Consolidação das áreas mais afectadas da pedra.....	100
5.2.3 Sistemas dissuasores de gaivotas/pombos.....	101
5.2.4 Tratamento das juntas.....	102
5.2.4.1 Remoção dos materiais não funcionais.....	102
5.2.4.2 Enchimento parcial dos vazios existentes.....	103
5.2.4.3 Refechamento superficial.....	103
5.2.5 Colagens e injeccção de fissuras.....	104
5.3 Conclusões.....	105
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
ANEXO – CD-ROM.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Síntese das zonas geotectónicas da Península Ibérica (CHAMINÉ, 2000). Zc – Zona Cantábrica; ZAOL – Zona Astúrica-Occidental Leonesa; ZGTM – Zona Galiza-Trás-os-Montes; ZCI – Zona Centro-Ibérica; ZOM – Zona de Ossa Morena; ZSP – Zona Sul Portuguesa; FCPT – Faixa de Cisalhamento Porto – Tomar; FCTBC – Faixa de Cisalhamento Tomar-Badajoz-Córdoba.....	10
--	----

Fig. 1.2 – Adaptação da folha geológica da CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO (2003). No canto superior direito encontra-se representado o enquadramento geológico da cidade do Porto num excerto retirado da folha 1 da Carta Geológica de Portugal à escala 1:200000. 0 – Local do Farol de São Miguel-o-Anjo na Foz do Douro.	16
Fig. 2.1– Motic SMZ-168	28
Fig. 2.2 – Lei de Bragg.	29
Fig. 2.3 – Interação entre o feixe electrónico incidente e a amostra no porta-amostras (figura do CEMUP).	30
Fig. 2.4 – Estrutura de um microscópio electrónico de varrimento – SEM. D: detectores, CA: corrente da amostra, DX: raios X, ER: electrões retrodifundidos, ES: electrões secundários, CR: monitor do tubo de raios catódicos, A: amostra (figura do CEMUP).	31
Fig. 2.5 – Esquema de funcionamento da microsonda de Raman. Detector de CCD (Charge-Coupled-Device).	32
Fig. 3.1 – «Margens do Douro - A Cantareira» (1848) é uma litografia de Cesário Augusto Pinto. Encontra-se no seu álbum «As Margens do Douro», constituindo uma das últimas representações do farol de S. Miguel-o-Anjo antes da construção do edifício dos Pilotos da Barra e da Torre dos Semáforos, em 1852. Retirado de JESUS (2003)	35
Fig.3.2.a) – Capela-Farol de S. Miguel-o-Anjo, vista de terra (desenho e reconstituição de Gouveia Portuense). Este farol, edificado em 1528, será o mais antigo farol português e o segundo mais antigo da Europa, tendo sido classificado como Imóvel de Interesse Público, em 5 de Janeiro de 1951 - Dec. N° 38147. Estes esquemas encontram-se em JESUS (2003)	36
Fig.3.2.b) – Planta da Capela-Farol de S. Miguel-o-Anjo (desenho e reconstituição de Gouveia Portuense), com o pátio (a tracejado) sobre o qual se viria a construir a obra oitocentista "Torre do Semáforo". Retirado de JESUS (2003)	36
Fig. 3.3 – Capela-Farol de S. Miguel-o-Anjo nas suas faces voltadas para o rio e para o lado nascente, invocando a protecção de Deus e incentivando aos navegadores a sua passagem, sem perigo, pela barra, menciona que num dos testemunhos deixados nas paredes deste edifício se refere que o farol acendia todas as noites e era sustentado pelos réditos do próprio Bispo, D. Miguel da Silva. Retirado de JESUS (2003)	36
Fig. 3.4 – a) Fachada lateral Nascente e b) Fachada lateral Sul do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro	37
Fig. 3.5 – Amostragem na Fachada Sul do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro	41
Fig. 3.6 – Amostragem na Fachada Nascente do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro	41
Fig. 3.7 – a), b), c), e d) – Desagregação granular no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro	44
Fig. 3.8 – a) e c) – Junta Aberta com argamassas inexistentes e Faltas. b) e d) - Buracos de granadas (projecteis) de canhões, na fachada Nascente.....	45
Fig. 3.9 – Crostas Negras no beiral da janela da Fachada Nascente do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro.....	47
Fig. 3.10 – Filmes negros nas fachadas Sul e Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo	49
Fig. 3.11 – a), b), c) e d) – Aspecto geral da alteração cromática (mancha)	50
Fig. 3.12 – Plaquetas/lascas associadas aos filmes negros no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro	51
Fig. 3.13 – a), b), c) e d) – Presença de vegetação no Farol de S. Miguel-o-Anjo	53
Fig. 3.14 – Presença de líquenes no Farol de S. Miguel-o-Anjo	54
Fig. 3.15 – Presença de Patina na Fachada Sul do Farol de S. Miguel-o-Anjo, com ampliação 6x57	
Fig. 3.16 – Gaivotas cujo nome científico é <i>Larus fuscus graellsii</i> na Foz do Douro.....	57
Fig. 3.17 – Cartografia das deteriorações existentes num sector da fachada Sul do Farol de S. Miguel-o-Anjo	64

Fig. 3.18 – Cartografia das deteriorações existentes num sector da fachada Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo.....	64
Fig. 3.19 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular das amostras de Líquenes (com ampliação de 20x): a) FSMA 2 – líquenes crustáceos de cor branca ou de talo ligeiramente fissurado aureolado; b) FSMA 5 – líquenes crustáceo de cor branca ou de talo ligeiramente fissurado aureolado e Líquenes foliáceos de talo esverdeado; c) FSMA10 – Líquenes foliáceos de talo esverdeado; d) FSMA 6 – Líquenes foliáceos de talo amarelos.....	65
Fig. 3.20 – Espectro de Raman e difractograma de Raio-X da amostra FSMA 2.....	67
Fig. 3.21 – – Espectro de Raman e difractograma de Raio-X da amostra FSMA 8.....	67
Fig. 3.22 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular das amostras de plaquetas (com ampliação de 20x): a) – FSMA1; b) – FSMA 14.....	68
Fig. 3.23 – Difractograma de Raio-X da amostra de plaqueta – FSMA 14.....	68
Figura 3.24 – Observação dos resultados da espectroscopia de Raman na amostra, FSMA3, FSMA4 e FSMA11, e observação ao microscópio estereoscópico binocular das amostras FSMA3 e FSMA4 (com ampliação e 20x.)......	70
Fig. 3.25 – Principais aspectos observados na amostra da crosta negra. c) e d) - Aspectos observados em MEV-EDS de cinzas volantes carbonosas, ricas em S, Si e Al depositadas sobre gesso. e) -Localização de Z1, Z2, Z3 e Z4 onde foram efectuados os difactogramas para análise de Difracção dos raios X – DRX. f), g), h) e i) – Difactogramas de Z1, Z2, Z3 e Z4. h) e i) – Observação ao microscópio estereoscópico binocular (com ampliação 20x) da crosta negra, e líquenes associados (a, b) e das cinzas volantes associadas.	72
Fig. 3.26 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular da amostra FSMA1, com ampliação 20x.....	72
Fig. 3.27 – Difractograma de Raio-X da amostra FSMA1.....	73
Fig. 3.28 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular da amostra FSMA 14, com ampliação 20x.	73
Fig. 3.29 – Amostra FSMA12, com filmes negros numa matriz granítica, com ampliação 20x....	74
Fig. 3.30 – Principais aspectos observados na amostra da patine verde (película verde). c) e d) - Aspectos observados em MEV-EDS de película sulfato de bário, ricas em Fe, Silicatos de magnésio (Si e Mg) e cloretos de sódio. e) -Localização de Z1, Z2 e Z3 onde foram efectuados os difactogramas para análise de Difracção dos raios X – DRX. f), g) e h) – Difactogramas de Z1, Z2 e Z3. a) e b) – Observação ao microscópio estereoscópico binocular da patine verde no granito, com ampliação 20x.	75
Fig. 3.31 – Espectro de Raman da amostra FSMA 9 – adúlria.....	76
Fig. 3.32 – Espectro de Raman da amostra FSMA 20 a) – quartzo com eflorescências.....	76
Fig. 3.33 – Espectro de Raman da amostra FSMA 20 b) – quartzo com partículas de poluição. ..	76
Fig. 3.34 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular das amostras FSMA9 e FSMA 20, com ampliação 20x.	77
Fig. 3.35 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular das argamassas presentes no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro, com ampliação 20x.....	83
Fig. 3.36 – Difractograma da amostra de argamassa FSMA 13 do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro.	83
Fig. 4.1 – População de <i>Larus fuscus graellsii</i> (gaivotas) na Foz do Douro.....	94
Fig. 4.2 – Pequena Idade do Gelo (adaptado de BROOKS/COLE, 2001).....	95
Fig.4.3 – Variações eustáticas de 1700 a 1970, segundo MORNER, 1993.....	95
Fig.4.4 – As fases regressivas parecem estar associadas às glaciações. Adaptado de NETO (2007).....	96
Fig. 4.5 – Temperaturas no Hemisfério Norte durante o último milénio (MANN <i>et al.</i> , 1999).....	97
Fig. 5.1 – Gaivotas cujo nome científico é <i>Larus fuscus graellsii</i> na Foz do Douro.....	101
Fig.5.2 – Juntas sem argamassas do Farol de S. Miguel-o-Anjo.....	102

Fig. 5.3 – Fachada lateral Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo. a) Juntas entre blocos que se encontram preenchidas com argamassas de cimento; b) Argamassas de cimento que se sobrepõem à pedra.	103
Fig. 5.4 – Juntas profundas sem argamassas na fachada Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro – Porto.	104
Fig. 5.5 – Fissuras nas pedras de granito Fachada lateral Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo.	105

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Principais datações isotópicas do Complexo Metamórfico da Foz do Douro (VIEIRA DA SILVA., 2001.).....	14
Quadro 1.2 — Composição química média de granitos alcalinos, calco-alcalinos e granodioritos.	19
Quadro 3.1 – Classificação das amostras recolhidas no Farol de S. Miguel-o-Anjo.....	40
Quadro 3.2 – Principais factores de meteorização e agentes mais comuns	42
Quadro 3.3 – Escala e parâmetros da deterioração de rochas (modificado de VILES 1997).....	59
Quadro 3.4 – Alteração em revestimentos (CHIODI, 1997)	61
Quadro 3.5 – Correlação entre as formas de deterioração, categorias (Fachada Sul e Fachada Nascente) e a intensidade de danos no Farol de S. Miguel-o-Anjo (adaptado de FITZNER <i>et al.</i> , 1992)	62
Quadro 3.6 – Principais minerais de sais solúveis – composições químicas e volumes molares. Adaptado de BEGONHA (2001)	81
Quadro 3.7 – Minerais de sais solúveis identificados por DRX e CryoSem/EDS no Farol de S. Miguel-o-Anjo	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais microrganismos responsáveis por biodeterioração da pedra: alguns dos seus produtos metabolismo e dos seus efeitos, Adaptado de WARSCHEID & BRAAMS, 2000.	52
Tabela 3.2 – Líquenes crustáceos (adaptado de MARQUES, 2008).....	55
Tabela 3.3 – Líquenes Foliáceo (adaptado de MARQUES, 2008).....	56
Tabela 3.4 – Formas de Meteorização com suas respectivas divisões em principais e individuais e suas abreviaturas correspondentes (Modificada de FITZNER <i>et al.</i> 1996).....	60
Tabela 3.5 – Medidas recomendadas em relação às categorias de danos (Modificada de FITZNER <i>et al.</i> 1996).	60
Tabela 4.1 – Composição aproximada da água do mar (AMARAL & CORREIA, “Química”, 12º ano de escolaridade, Porto Editora, 1998.)	93

LISTA DE ABREVIATURAS

DRX – Difracção de Raios X
 CCD – Charge-Coupled-Device
 CEMUP – Centro de Materiais da Universidade do Porto
 CMFD – Complexo Metamórfico da Foz do Douro

CryoSEM – Microscopia Electrónica de Varrimento a baixa temperatura
CXG – Complexo Xisto-Grauváquico
EBSD – Análise de Padrões de Difracção de Electrões Retrodifundidos
EDS – Espectroscopia de dispersão de energias
EDS-WDS – Espectroscopia de dispersão de energias com microanálise por raios X
ER – Electrões retrodifundidos,
ES – Electrões secundários
FCPT – Faixa de Cisalhamento Porto – Tomar
FCTBC – Faixa de Cisalhamento Tomar-Badajoz-Córdoba
FCUP – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
FSMA – Local da recolha de amostras no Farol de S. Miguel-o-Anjo
GPS – Sistema Global de Posicionamento (Global Positioning System)
ICCROM - Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property
ICOMOS - International Council on Monuments and Sites
LMM – Late Maunder Minimum
LN2 – Azoto Liquido
MA – Milhões de Anos
MEV-EDS – Microscopia electrónica de varrimento equipada com microanálise de raios X
ROM – Reserva Ornitológica de Mindelo
RT – Rocha Total
SEM / MEV – Microscopia electrónica de varrimento
UGFD – Unidade dos gnaisses da Foz do Douro
ULO – Unidade de Lordelo do Ouro
UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
ZAOL – Zona Astúrica-Occidental Leonesa
Zc – Zona Cantábrica
ZCI – Zona Centro-Ibérica
ZGTM – Zona Galiza-Trás-os-Montes
ZOM – Zona de Ossa Morena
ZSP – Zona Sul Portuguesa

«Do erro de quem exerce a prática sem a ciência. Aqueles que se enamoram da praxis sem a ciência são como navegantes que embarcam sem timão nem bússola; nunca saberão que rumo vão tomar. Toda a praxis deve estar fundamentada numa boa teoria».

DA VINCI, Leonardo, ob.cit., p. 53, (tradução livre).

INTRODUÇÃO GERAL / ESTADO ACTUAL ARTE

A ciência vem desde sempre tentar desvendar os fenómenos individuais da deterioração dos materiais graníticos aplicados em património construído e diagnosticar a evolução petrográfica, mineralógica e geoquímica em sistemas actuais desequilibrados por factores ambientais

O presente trabalho tem como objectivo diagnosticar o estado de deterioração do granito no Farol de S. Miguel-O-Anjo (Foz do Douro) no Porto e contribuir para a melhoria da qualidade das acções de conservação do património construído.

As rochas são sistemas químicos, mono ou polifásicos, resultantes do equilíbrio termodinâmico atingido pelas suas fases constituintes em determinados ambientes geológicos.

O conceito de alteração da rocha é meramente geológico, enquanto a alterabilidade de uma rocha é a sua alteração medida em função do tempo humano, é a vida da rocha que é usada na construção à escala da vida da própria obra de arquitectura – são várias décadas, alguns séculos. A alterabilidade é uma taxa de decaimento durante a vida atribuível à obra. Para compreender a dinâmica dos fenómenos de alteração e a alterabilidade previsíveis, há que averiguar: primeiro, da natureza destes fenómenos ocorrentes na pedreira onde a rocha foi explorada; depois, nas oficinas de transformação onde sofreu operações de corte; e, por fim, o que ocorre na aplicação da rocha em obra, no monumento.

A rocha é um agregado policristalino de um ou mais minerais, que tem uma textura que é relevante, porque se repercute em duas grandezas primordiais para a caracterização das rochas e para a previsão e explicação do seu comportamento geomecânico e geoquímico. São elas a porosidade e a permeabilidade.

O espaço ocupado por uma dada rocha é constituído por macro, micro e nano partículas, por vazios (poros, fissuras, diaclases e fracturas) e por uma fase fluida, contínua e móvel, gasosa e/ou líquida que preenche aqueles vazios. Diria que a rocha “respira” por meio deste sistema vascular (macro, micro e infra porosidade). Com efeito quer a estabilidade física (coesão, anisotropia das tensões instaladas e o comportamento em relação às forças exógenas) quer a reactividade química (reacções químicas inter e

intra-cristais) estão fortemente dependentes da textura das rochas e consequentemente, das respectivas porosidades e permeabilidades.

Um monumento é, ao mesmo tempo, uma construção e um bem cultural. As intervenções que os envolvam devem atender, simultaneamente, a uma e outra destas vertentes. Enquanto construção, as intervenções pressupõem conhecimentos técnicos dos materiais e sistemas construtivos tradicionais e contemporâneos: por um lado, as velhas "artes e ofícios" e os materiais originais são, muitas vezes, preferíveis às tecnologias que hoje têm mais peso nos hábitos dos avançados, que ainda não entraram nesses hábitos.

Enquanto bem cultural, as intervenções devem respeitar os princípios da conservação, e pressupõem uma filosofia própria e métodos especializados de estudo, avaliação e intervenção multidisciplinares, capazes de se adaptarem a cada caso concreto.

As intervenções de conservação em monumentos e edifícios históricos são sempre perturbadoras do equilíbrio em que eles se encontram, representando um risco para a sua integridade e autenticidade. As intervenções devem, por consequência, cingir-se ao mínimo necessário para atingir, com eficácia, os objectivos preconizados. Exigem rigor e contenção, ao nível da definição da estratégia, da concepção, da recolha de informação, do projecto, da execução e da fiscalização.

A este respeito, interessa referir o que diz o Eurocódigo 8, no seu Anexo F, "*Particular considerations for historical buildings and monuments*": (1) As provisões referentes a edifícios correntes só são aplicáveis aos monumentos e edifícios históricos se não produzirem efeitos negativos na sua salvaguarda; (2) As técnicas de intervenção propostas para um monumento devem preencher os requisitos da salvaguarda, aplicando critérios de Eficácia, Compatibilidade, Durabilidade e Reversibilidade.

Idêntica é a postura assumida pela normativa italiana, que distingue dois graus de intervenção em património arquitectónico: intervenções de *miglioramento*, envolvendo a execução de uma ou mais obras incidindo sobre elementos estruturais isolados com o objectivo de conseguir um maior grau de segurança sem modificar, de modo substancial, o comportamento global, e intervenções de adequamento, destinadas a tornar o edifício apto a resistir às acções sísmicas previstas na regulamentação. A prioridade da salvaguarda da autenticidade do monumento sobre o respeito pelas prescrições regulamentares é, de resto, a linha preconizada pelo Conselho da Europa, quando estabelece que "*As normas usuais de construção e de segurança dos edifícios não deverão aplicar-se de forma automática ao património arquitectónico. As medidas e as normas deverão ser postas em prática graças a regras de eficácia que resultem de uma escolha flexível e optimizada de medidas organizacionais, técnicas e estruturais*" (ponto 11. do Anexo à Recomendação n.º R (93) 9: "*Protecção do património arquitectónico contra as catástrofes naturais*").

A contemporânea teoria da conservação ficou inevitavelmente marcada pelas bases gerais fixadas por BRANDI (Teoria do Restauro, 1963), contínua e activamente actualizadas por CARBONARA (1997), e a sua gradual contestação que começou exactamente ao se discutir a aplicabilidade de algumas das bases da teoria de BRANDI (1963) sobre a arquitectura e a cidade histórica, onde outros valores existem para além dos ligados à precedência da imagem sobre a matéria, sobretudo se aceitarmos a arquitectura como um processo que resulta de múltiplos protagonistas, que não só o “artista/autor”.

Como dizia há muito KANDINSKY (1926) nas suas aulas da Bauhaus (Amanhã = Ontem + Hoje). Se defendemos que a essência da conservação se refere a questões e âmbitos de natureza cultural é assim lógico estabelecer bases de referência suficientemente aceites numa dada cultura e baseados em alargados processos de discussão cultural e teórica que possam guiar as escolhas e reduzir ao mínimo as idiossincrasias pessoais.

Nesse sentido países como a Itália, por exemplo, procuraram com documentos de referência, como a “Carta Italiana do Restauro de 1972”, estabelecer verdadeiros contratos sócio-culturais quanto à definição programática dos conceitos e dos modos que devem presidir ao desenvolvimento de projectos de conservação.

Da revisão bibliográfica efectuada sobre a importância do estudo da deterioração do património construído em pedra, resultou a ideia de que a razão maior vem da importância que o Homem tem atribuído ao longo dos tempos às rochas e seus constituintes minerais. Efectivamente, desde o início da sua existência que o Homem usa noções empíricas de geologia na procura de recursos naturais e matérias-primas, transmitindo-as geração após geração para aplicação a situações do dia-a-dia.

Os geomateriais de construção, principalmente o granito, as areias, os arenitos, os calcários e os mármore, são cada vez mais estudados, numa tentativa de responder à sua crescente procura. A má selecção destes, pode facilitar os processos de deterioração. Por outro lado, é necessário não esquecer os enormes volumes de pedra que foram necessários para a construção das cidades, devendo calcular-se os proventos económicos que Portugal retirou e retira da exploração das suas rochas naturais, pelo que não poderão dispensar-se, no futuro próximo, as potencialidades do nosso território nesses recursos (LEITE & MACHADO, 1999).

Diversos trabalhos sobre a deterioração de monumentos em granito têm vindo a ser realizados em Portugal, mas o seu número continua a ser muito reduzido, quando comparado com o número de trabalhos publicados sobre monumentos erguidos com rochas calcárias, mármore ou arenitos (BEGONHA, 2001a), rochas empregues em muito maior número de edificios devido ao facto de o granito ser uma rocha mais difícil de trabalhar e de a maior parte dos afloramentos serem de rochas sedimentares.

Nos nossos dias, assiste-se a um aumento da preocupação pela preservação do património em pedra, uma vez que corresponde a um legado histórico insubstituível. Essa preocupação tem fundamento, atendendo a que factores externos à rocha têm vindo a provocar a degradação dos edifícios que, em muitas situações, constitui um processo de difícil solução ou até irreversível, conduzindo ao desmoronamento parcial ou total das estruturas. Segundo SIEGESMUND *et al.* (2002), a protecção da herança arquitectónica reveste-se de importância cultural e histórica, bem como de valor económico e geoecológico.

Os processos de deterioração podem ser minimizados, retardados ou mesmo eliminados se se atender aos resultados dos estudos que têm vindo a ser efectuados. A determinação das características petrográficas e petrofísicas (com ensaios físicos em amostras de afloramentos semelhantes aos tipos de pedras utilizados nas obras) é muito importante, pois permite o estudo das propriedades físicas dos materiais de forma indirecta, tendo em consideração as fortes restrições colocadas ao processo de amostragem (ALVES, 2000).

A deterioração das construções com valor histórico é considerada um problema desde a Antiguidade. As pirâmides egípcias e aztecas, as construções romanas, gregas, incas, maias, hindus e cambojanas são exemplos da busca de materiais resistentes, tendo sobrevivido vários séculos ou mesmo dezenas de séculos. Assim, uma parte importante da cultura humana foi esculpida em pedra, correndo-se o perigo de a perder (AMOROSO & FASSINA, 1983).

A Humanidade reconhece que este património comum deve ser transmitido às gerações futuras na plenitude da sua autenticidade, devendo ser por isso mantido. COSTA (2002a) acrescenta que *"intervir no património é, nos dias de hoje, não uma arbitrariedade de países desenvolvidos, mas uma necessidade com repercussões sociais e económicas importantes. É a nossa história, o que fomos e o que legamos ao mundo que interessa preservar, reabilitando espaços e criando novos pólos e apelos à cultura e ao turismo"*.

Em consequência deste reconhecimento, vem a tomada de consciência sobre a importância da investigação na área da deterioração dos materiais pétreos, conduzindo actualmente à necessidade da implementação de medidas permanentes de conservação sustentável a longo prazo. COSTA (2002b) refere ainda que *"no presente tempo, o homem nota a necessidade de saber ver e sentir de onde veio, para decidir do seu caminho futuro. Essa necessidade leva-nos portanto a conservar, segundo um critério científico e actual, os testemunhos da vida, da arte e da cultura do passado que conseguiram chegar até nós, constituindo assim uma aspiração da sociedade contemporânea, como forma de combater o seu desenraizamento."*

Sendo assim, os princípios que devem presidir à conservação e ao restauro dos monumentos devem ser elaborados em comum e formulados num plano internacional,

ainda que caiba a cada nação aplicá-los no contexto da sua própria cultura e das suas tradições.

Organizações internacionais como a UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), o ICCROM (Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property), o ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) têm promovido acções diversas que vão desde o financiamento de projectos, a publicação de artigos e trabalhos ou até a aprovação de textos que são documentos fundamentais de trabalho, como a Carta de Atenas de 1931, que contribuiu para a propagação de um amplo movimento internacional traduzindo-se principalmente sob a forma de documentos oficiais em vários países, a Carta de Veneza de 1964, a Declaração de Palma de 1965, a Convenção do Património Mundial de 1972, onde se manifestou a preocupação com a salvaguarda do património construído, a Declaração de Amesterdão, que alargou o conceito de "*Património*" ao património arquitectónico em geral e, o Simpósio de Sofia de 1996, que ressaltou o facto de o património pertencer às comunidades.

Segundo BEGONHA (1997, 2001a), investigações futuras deveriam incidir igualmente nos processos de limpeza, tratamento, recuperação e protecção das pedras afectadas pelas diferentes patologias, recorrendo designadamente a estudos experimentais dos produtos e técnicas de aplicação a empregar em cada caso.

Por outro lado, BEGONHA (2001a) refere que "numa época em que se concretizam numerosos projectos de limpeza e restauro de muitos monumentos e edifícios de interesse histórico, frequentemente sem estudos prévios sobre as origens das patologias ou mesmo de estudos de optimização de um método de limpeza eficaz e simultaneamente pouco agressivo para a pedra, é indispensável fazer o diagnóstico das deteriorações do material pétreo". COSTA (2002b) aponta para a conveniência de conjugar esforços e gastos e para que numa primeira fase seja materializada uma base de informação que disponibilize o conhecimento sobre a natureza e problemática do monumento, assente no reconhecimento directo e no estudo e análise das fontes documentais já disponíveis, bem como na reflexão sobre as circunstâncias que motivaram a necessidade de intervir. É assim necessário proceder a uma análise complexa com abordagens coordenadas dos objectivos do estudo e intervenção e dos métodos e técnicas a aplicar.

APPLETON (2002) chama "*estudo de diagnóstico*" ao conjunto de procedimentos destinados a garantir o justo conhecimento acerca de um edifício ou estrutura, incluindo a avaliação do seu estado de conservação e segurança e a determinação das causas das anomalias observadas. Refere que a realização deste diagnóstico é essencial a uma correcta intervenção sobre o património construído e tem de ser anterior a qualquer acção projectual ou construtiva, já que é o ponto de partida para o estabelecimento das tecnologias e dos materiais que melhor se adequam às características físicas e à história do objecto a intervencionar.

A importância cultural e histórica do nosso património construído obriga à sua protecção, tanto mais que, a nível mundial, as medidas de preservação dos monumentos e edifícios históricos são já entendidos como tendo um substancial valor económico e ecológico. Há um incremento nas publicações, organização de conferências e congressos com notória representatividade de cientistas, investigadores e instituições. AIRES-BARROS (2001) refere que a colaboração internacional aumentou largamente, quer no âmbito da ONU, da INVOTAN e muito particularmente em projectos de investigação financiados pela União Europeia.

Em 1964, durante o II Congresso Internacional de Arquitectos e Técnicos de Monumentos Históricos, realizado na cidade de Veneza, foi aprovada, embora com carácter normativo, o que passou a ser designado como "*Carta de Veneza de 1964 – Carta Internacional sobre a conservação e o restauro de monumentos e sítios*". Este documento reflecte a evolução que o conceito de conservação do património estava então a sofrer, definindo o conceito de "monumento histórico", para além da aprovação de todo um texto com princípios orientadores que constituem a nova atitude face à conservação e restauro das "criações arquitectónicas e sítios onde sejam patentes os testemunhos de uma civilização particular". No Artigo 2º, vem redigido que "a conservação e o restauro dos monumentos constituem uma disciplina que reclama a colaboração de todas as ciências e técnicas que possam contribuir para o estudo e a salvaguarda do Património Monumental".

Em Portugal, em 1721, D. João V (1689-1750), a quem se atribui a construção do Aqueduto das Águas Livres de Lisboa e do Palácio de Queluz e o início da construção do Convento de Mafra, apresenta em alvará, com a data de 20 de Agosto, um documento que pretendia salvaguardar o património cultural nacional, atribuindo o exame dos monumentos antigos à Academia Real da História, "*... para que nenhuma pessoa possa desfazer, nem destruir Edifício que mostre ser antigo, em Estátuas, ou Medalhas*".

A conservação do património caracterizava-se então, por uma ausência de rigor científico, inicialmente baseada num critério historicista e assim continuou até recentemente. Entendida como um processo contínuo de investigação e aprendizagem que importa divulgar, passa a ser o objectivo nos últimos anos, com o crescente interesse a nível académico, associado aos novos meios técnicos disponíveis.

O técnico terá de recolher o maior número de dados possível, potenciando todas as leituras para que uma investigação pluridisciplinar, baseada em fontes documentais, possa levar a acções que salvaguardem o património e o façam permanecer no tempo. Contudo, urge otimizar os procedimentos na análise e controlo das deteriorações, bem como investir na monitorização e sistemas de prevenção.

Este crescente interesse conduziu à publicação da Lei nº 13/85 de 6 de Junho, Lei do Património Cultural Português, onde se pode ler no artigo 2º, que "*constitui obrigação*

do Estado e demais entidades públicas promover a salvaguarda e valorização do património cultural do povo português".

É possível encontrar diversos trabalhos publicados que envolvem monumentos nacionais de reconhecido valor, como por exemplo o Mosteiro dos Jerónimos (Aires-Barros e Maurício, 1992, AIRES-BARROS, 2001), Hospital de Santo António e Torre dos Clérigos (LNEC, 1991a, BEGONHA & SEQUEIRA BRAGA, 1993, DELGADO RODRIGUES *et al.*, 1994, BEGONHA, 1997, 2001a), Edifício do Largo do Paço e Museu dos Biscainhos em Braga (ALVES & SEQUEIRA BRAGA 1993; ALVES, 1997; MATIAS & ALVES, 2002), Sé Velha e Igreja de Santa Cruz de Coimbra (AIRES-BARROS & BASTO 1997, 1998) e Sé de Lisboa (AIRES-BARROS, 2001).

Estudo do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro

Após o enquadramento geomorfológico, geológico e climático do local, realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre a arquitectura, história e intervenções realizadas no monumento. Fez-se a avaliação da extensão e origem das deteriorações observadas no Farol de S. Miguel-o-Anjo. De seguida, efectuou-se o estudo mineralógico, petrofísico e geoquímico de um dos tipos de granito empregues no Farol de S. Miguel-o-Anjo. Procedeu-se à descrição, amostragem e cartografia das principais deteriorações que afectam o monumento, complementando-se esse estudo com os levantamentos cartográficos das litologias e das deteriorações da pedra. Caracterizam-se mineralogicamente as amostras de deteriorações, recorrendo a diversas técnicas microscópicas de observação e ensaios.

Os resultados foram analisados através de comparações com estudos de outros autores, permitindo determinar de que modo diversos factores controlam a alteração de uma rocha, designadamente, a composição mineralógica, a textura, as propriedades físicas e geoquímicas, o estado inicial de meteorização, as condições climáticas e os poluentes atmosféricos.

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, para além da introdução geral/estado actual da arte, das conclusões do trabalho e das referências bibliográficas. Apresentam-se, em anexo, os resultados de todos os ensaios efectuados no âmbito da presente tese de mestrado.

Assim, o Capítulo 1 incide sobre a Geologia da Foz do Douro, refere aspectos da geomorfologia local, do enquadramento do monumento no contexto geológico. Caracterização geotécnica, petrográfica e química dos granitos do Porto, meteorização dos granitos.

Com o propósito de caracterizar mineralógica, petrofísica e geoquimicamente um dos granitos aplicados na construção do Farol, apresentam-se e discutem-se, no Capítulo 2, os métodos e os resultados obtidos a partir das técnicas experimentais utilizadas, microscópio estereoscópico binocular, difracção dos raios X (DRX), microscopia

electrónica de varrimento (SEM), e da espectroscopia de efeito Raman. Comparam-se ainda os resultados com os de outros granitos referidos na bibliografia e apresentam-se as correlações entre as diferentes propriedades estudadas no granito do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro.

No Capítulo 3, estudam-se macroscopicamente as formas de diagnóstico da deterioração que afectam as pedras do Farol de S. Miguel-o-Anjo da Foz do Douro, através do estudo pormenorizado de amostras recolhidas nas zonas mais deterioradas, com descrição macroscópica e respectiva localização, e referem-se breves apontamentos sobre a história do Farol de S. Miguel-o-Anjo, bem como as características gerais da arquitectura da Farol e das intervenções de preservação e restauro realizadas desde o início do século XX. Estabelece-se um quadro de deterioração, com base no levantamento das deteriorações, da sua distribuição e da sua relação com as características arquitectónicas. As cartografias das litologias e das deteriorações de áreas representativas do monumento são também mencionadas neste capítulo. Apresenta-se também o estudo mineralógico das deteriorações exibidas pelas pedras do monumento, recorrendo à estereoscópica binocular, difracção dos raios-X, microscopia electrónica de varrimento e espectroscopia de efeito Raman e procedendo-se à indicação dos minerais de sais solúveis observados.

No capítulo 4 faz-se uma abordagem à evolução da qualidade de ar na Foz do Douro nos últimos anos, à composição das águas das chuvas e faz-se uma abordagem aos dejectos orgânicos das aves (pombos e gaivotas).

No capítulo 5 propõem-se algumas medidas de conservação do granito do Farol de S. Miguel-o-Anjo, para a eliminação dos agentes causadores da degradação da pedra, e para a obtenção de melhores condições à acção dos agentes do ambiente

Apresentam-se em seguida as considerações finais e apontam-se limitações e implicações desta investigação. É realizada uma reflexão sobre o trabalho e seus contributos para a formação profissional do autor.

Na parte final do trabalho indicam-se as referências bibliográficas e, em anexo, os resultados de todos os ensaios efectuados.

Os objectivos gerais traçados neste trabalho de investigação foram os seguintes:

- Estabelecimento do suporte teórico para a construção do trabalho, com revisão de bibliografia sobre estudos relevantes que envolvam este tema;
- Enquadramento geográfico e geológico local do monumento;
- Inventariação e diagnóstico das deteriorações presentes nas pedras do Farol de S. Miguel-o-Anjo da Foz do Douro, no Porto até uma altura de 2,50 metros do solo;
- Definição das possíveis fontes de minerais de sais solúveis e identificação dos minerais responsáveis por essas deteriorações.

1. INTRODUÇÃO

A cidade do Porto está localizada na margem direita do Rio Douro, no NW de Portugal, sendo uma das cidades mais antigas da Europa. A história da cidade do Porto remonta, pelo menos, ao século VI, desde o tempo dos Suevos. A conquista do designado Portucale, em 868 A.D., a primeira designação da região do Porto, é considerada como um dos acontecimentos mais importantes da história antiga da cidade do Porto. No entanto, depois de 868 A.D., esta cidade tornou-se o centro do movimento da reconquista cristã na Península Ibérica. A cidade do Porto tornou-se uma importante urbe desde o século XII e tem-se desenvolvido ao longo das escarpas graníticas do Rio Douro. A zona histórica da cidade, face ao seu espólio arquitectónico e histórico, conduziu ao seu reconhecimento como património mundial da UNESCO em 1996.

1.1 A Geologia do Porto

A área urbana do Porto está localizada num domínio geotectónico complexo do Maciço Ibérico (RIBEIRO *et al.*, 1990), isto é na faixa de cisalhamento de Porto – Coimbra – Tomar (CHAMINÉ *et al.*, 2003). O substrato rochoso cristalino da cidade do Porto é constituído essencialmente por granitos na zona oriental e por um complexo de gnaisses e micaxistos na região ocidental (MARQUES *et al.*, 2000).

O enquadramento geotectónico regional da área urbana do Porto (e.g., SHARPE, 1849; BARATA, 1910; ROSAS DA SILVA, 1936; CARRINGTON DA COSTA, 1938, 1958; CHAMINÉ, 2000; ALMEIDA, 2001; CHAMINÉ *et al.*, 2003) compreende um substrato cristalino fortemente deformado com uma complexa história tectonometamórfica do Proterozóico superior / Paleozóico. O granito do Porto é um granitóide de duas micas, de grão médio ou médio a fino, cinzento, apresentando-se bege amarelado quando está alterado. Este granito encontra-se, geralmente, meteorizado em diferentes graus, desde rocha sã a solo residual, exibindo condições geotécnicas muito variáveis, resultante especialmente da arenização e caulnização, as quais podem atingir profundidades superiores a 100m (e.g., BEGONHA & SEQUEIRA BRAGA, 1995; BEGONHA, 2001; GAJ *et al.*, 2003). A paleoalteração química ocorreu durante a era Cenozóica, sob condições climáticas tropicais a subtropicais (ARAÚJO *et al.*, 2003).

Em termos geomorfológicos regionais, a região do Porto corresponde a uma área aplanada, inclinando ligeiramente para os quadrantes Sul e Oeste. Existem evidências ubíquas de actividade neotectónica, tais como: a) falhas geológicas abundantes (principalmente inversas) que afectam os depósitos mais elevados desta plataforma litoral; b) os mesmos níveis marinhos parecem ocorrer a diferentes altitudes,

desenvolvendo-se um padrão irregular com uma ligeira inclinação de Norte para Sul (NORONHA, 2005; ARAÚJO *et al.*, 2003).

Na zona ocidental da Cidade do Porto, na estreita orla litoral entre a foz do rio Douro e o Castelo do Queijo, encontram-se magníficos afloramentos de variadas rochas metassedimentares, com metamorfismo de alto grau, espacialmente associadas a rochas ortognáissicas de diferentes tipos e anfibolitos, que no seu conjunto foram cortadas por granitos de idade hercínica. Estes afloramentos contrastam com os da zona oriental onde os ortognaisses e anfibolitos estão ausentes e em que micaxistos e metagrauvaques, constituindo uma sequência relativamente monótona e menos metamorfizada, são também recortados por granitos hercínicos.

Toda a plataforma litoral, sobre a qual assenta a cidade do Porto, desenvolve-se em rochas do Maciço Antigo, que corresponde a um soco Pré-câmbrico e hercínico, muito fracturado pelas diversas fases orogénicas, nomeadamente pela tectónica terciária e quaternária.

A cidade do Porto assenta essencialmente na Zona Centro-Ibérica (ZCI). Mas, dada a possibilidade da sutura Porto-Tomar passar pela Foz do Douro, marcando o limite entre a ZCI e a Zona de Ossa Morena, pode-se considerar que o Porto se encontra no limite entre aquelas duas zonas. De facto, e segundo as zonas demarcadas por Lotze para o Maciço Hespérico, a Zona Centro-Ibérica, que corresponde ao chamado "Complexo Xisto Grauváquico" (figura 1.1).

Na cidade do Porto distinguem-se três tipos de formações geológicas: formações sedimentares de cobertura, formações metamórficas e formações ígneas. Estas formações foram diferenciadas na Carta Geológica elaborada no âmbito da CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO (2003), à escala 1/10 000. Mas o grupo mais significativo é o das formações ígneas, particularmente o das rochas graníticas. Senão, vejamos com um pouco mais de atenção.

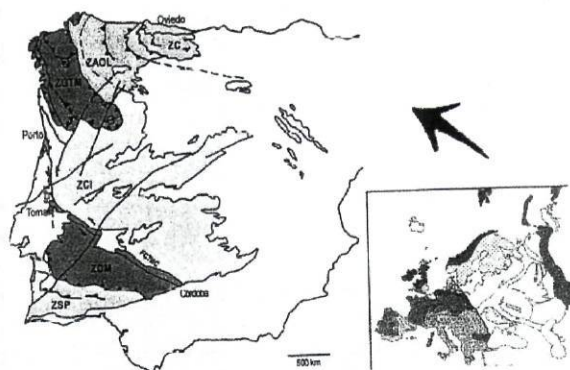


Fig. 1.1 – Síntese das zonas geotectónicas da Península Ibérica (CHAMINÉ, 2000). Zc –

Zona Cantábrica; ZAOL – Zona Astúrica-Occidental Leonesa; ZGTM – Zona Galiza-Trás-os-Montes; ZCI – Zona Centro-Ibérica; ZOM – Zona de Ossa Morena; ZSP – Zona Sul Portuguesa; FCPT – Faixa de Cisalhamento Porto – Tomar; FCTBC – Faixa de Cisalhamento Tomar-Badajoz-Córdoba.

De facto, o substrato litológico em que assenta a cidade do Porto é essencialmente constituído por rochas graníticas e xistosas da era primária e por alguns depósitos

quaternários que se situam sobre as primeiras como fruto da inter-relação da dinâmica fluvial e oceânica. As rochas mais antigas pertencem ao "Complexo Xisto-Grauváquico" segundo SILVA (2000) e localizam-se na zona oriental da cidade. Este complexo é considerado ante-Ordovício (sobre ele assentam, em discordância estratigráfica, as séries do Silúrico, Devónico e Carbónico, que se encontram já fora da plataforma litoral inseridas na estrutura do anticlinal de Valongo) segundo SILVA (2000). Nestes afloramentos, os micaxistos e metagrauvaques constituem uma sequência relativamente monótona e metamorfizada, sendo frequentemente recortados por granitos hercínicos (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003).

Também metamórficas são as rochas da zona mais ocidental da cidade do Porto, na estreita orla litoral entre a foz do rio Douro e o Castelo do Queijo, formando o chamado "Complexo da Foz do Douro". Aqui se encontram afloramentos de variadas rochas metassedimentares, com metamorfismo de alto grau, especialmente associadas a rochas ortognaissicas de diferentes tipos e anfibolitos (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003).

1.1.1 Rochas Ígneas

Dentro do campo das formações ígneas é que vamos encontrar o mais significativo conjunto petrográfico da área sobre a qual assenta a cidade do Porto: trata-se de uma grande mancha granítica. Apesar de se detectarem diferentes tipos de granito (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003), ganha especial importância o denominado *Granito do Porto* pelo seu peso representativo. A este tipo de granito daremos mais atenção, uma vez que ele constitui a mais significativa mancha petrográfica da cidade do Porto, nomeadamente na antiga pedreira da Trindade, na rua da Restauração, na Marginal do Rio Douro, etc., como também é o material mais usado na construção dos seus monumentos, nomeadamente no farol de S. Miguel-o-Anjo, objecto deste estudo.

O *Granito do Porto* corresponde a uma mancha quase contínua, que começa na margem sul do Douro, estendendo-se para SE até Oliveira do Douro, e que se prolonga para NW até Labruge (Vila do Conde). No seu conjunto este maciço define, assim, um alinhamento NW-SE devido às estruturas hercínicas e está envolvido pelos já referidos terrenos metamórficos que a nordeste pertencem ao Complexo Xisto-Grauváquico e a sudoeste ao Complexo metamórfico da Foz do Douro, segundo ALMEIDA (2001 e 2003), BEGONHA (2003), VIEIRA (2003) e RAMOS (2003). Apesar de poder ostentar pequenas variações, no que diz respeito às características petrográficas, o *Granito do Porto* corresponde a um granito de duas micas, com predomínio da moscovite sobre a biotite, de grão médio, por vezes ligeiramente orientado (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003). É predominantemente não porfiróide podendo revelar-se localmente com uma tendência porfiróide e com uma granularidade variando de média a média a fino.

As variações são graduais, o que explica a dificuldade de estabelecimento dos limites entre as diversas fácies (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003).

Segundo o trabalho de ALMEIDA (2001), intitulado "Caracterização Geoquímica e Geocronológica do Granito de duas micas sintectónico do Porto (NW de Portugal)", a análise petrográfica (do Granito do Porto) revelou quartzo xenomórfico quer em grãos de dimensões médias exibindo extinção ondulante, quer em aglomerados de pequenos cristais recrystalizados. O feldspato potássico mais abundante é a ortoclase seguido da microclina, por vezes pertítico e de dimensões levemente maiores do que as dos restantes minerais. São frequentes aspectos de intensa caulinização do feldspato potássico. É também de assinalar processos de albitização a partir do desenvolvimento das pertites que por vezes se insinuam ao longo do plano de macla Carlsbad. A plagioclase é uma oligoclase-albite, frequentemente sericitizada e moscovitizada. A biotite é o mineral máfico mais representativo, exibindo cor castanha e fortemente pleocróicos, com abundantes inclusões de zircão e, mais raramente, de apatite, com halos pleocróicos. A moscovite é sempre mais abundante do que a biotite, ocorrendo quer em placas bem desenvolvidas de moscovite primária quer em grande parte como o resultado da moscovitização da biotite e da plagioclase ou em associações symplectíticas com o quartzo. Os minerais acessórios são raros, tendo-se assinalado a presença esporádica de opacos, turmalina e granada.

O granito porfiróide biotítico com plagioclase cálcica de grão médio a grosseiro (tardi-a pós-orogénicos), está representado nomeadamente no afloramento sobre o qual assenta o Forte de S. Francisco Xavier, vulgarmente designado por Castelo do Queijo, assim como em pequenos afloramentos que ocorrem, por exemplo, junto ao rio Douro na zona da Cantareira bem como na praia da Luz. De referir que apresentam características idênticas às de granitos que ocorrem a sul do rio Douro (BORGES *et al.*, 1985, 1987; MARQUES *et al.*, 1994; NORONHA, 2000).

Nos granitos de Entre Douro e Minho (DIAS, 1987, SEQUEIRA BRAGA, 1988, BRILHA, 1992, ALMEIDA, 1994, 2000, 2001, BEGONHA, 1997, 2001A, BEGONHA & SEQUEIRA BRAGA, 2002), os efeitos da alteração tardi-a pós-magmática traduzem-se mineralogicamente na moscovitização de plagioclase, feldspato potássico e biotite, na albitização do feldspato potássico e cloritização da biotite de que resultam a formação de várias gerações de micas dioctaédricas, por vezes associadas à fibrolite, a formação de plagioclase secundária responsável pela pertitização do feldspato potássico e a formação de clorite à qual se associam o rútilo e a leucoxena (ASSUNÇÃO, 1962; NORONHA, 1994, 2000). No *Granito do Porto*, estes fenómenos estão associados à formação de raros interestratificados expansivos clorite/esmectite e de uma fase esmectítica pura (BEGONHA, 1997, 2001a, BEGONHA & SEQUEIRA BRAGA, 2002).

Os terrenos graníticos sobre os quais assenta a cidade do Porto são predominantemente constituídos por granitos de duas micas sintectónicos. O maciço, no seu conjunto, define um alinhamento NW-SE devido às estruturas hercínicas e está envolvido por

terrenos metamórficos que a nordeste pertencem ao Complexo Xisto-Grauváquico e a sudoeste ao Complexo Metamórfico da Foz do Douro (CMFD) (NORONHA, 1994; NORONHA & LETERRIER, 1995; MARQUES *et al.*, 2000). Os granitos da cidade do Porto são granitos de duas micas, com predomínio de moscovite, que exibem por vezes uma textura orientada (N130°E). Porém podem revelar-se com uma textura não porfiróide ou com uma textura porfiróide ou de tendência porfiróide, uma granularidade que pode variar de média a grosseira ou de fina a média, e uma percentagem variável de biotite e moscovite (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003). Recentes dados isotópicos U-Pb em zircão e monazite sugerem a idade de 318 ± 2 Ma para a instalação do *Granito do Porto* (ALMEIDA, 2001).

Mas o chamado *Granito do Porto* surge sempre alterado, segundo ALMEIDA (2001), com maior ou menor intensidade. As agressões atmosféricas e ambientais têm causado uma acentuada degradação do granito particularmente verificada nas patologias exibidas em edifícios da cidade e na instabilidade das escarpas das margens do Douro. De um modo geral, da diversidade de aspectos de deterioração do granito, segundo BEGONHA (1997) destacam-se a formação de filmes negros, de crostas e de placas, a desagregação granular e a colonização biológica.

Assim, e após uma breve análise do material pétreo mais comum da cidade do Porto, propomo-nos estudar um caso degradado de uma parte de um monumento em *Granito do Porto*, que ostenta diversas patologias na sua estrutura física e que é o Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro no Porto.

1.1.2 Rochas Metamórficas

Estes factos e o estado actual dos conhecimentos da geologia regional levaram a considerar as rochas metamórficas distribuídas por dois conjuntos distintos: "Complexo Metamórfico da Foz do Douro" (CMFD) (NORONHA, 1994; NORONHA & LETERRIER, 1995; MARQUES *et al.*, 2000) e "Complexo Xisto-Grauváquico" (CXG).

Segundo NORONHA & LETERRIER (1998), o Complexo Metamórfico da Foz do Douro (CMFD), pode, no seu conjunto, considerar-se no essencial, e face ao estado actual dos conhecimentos, constituído por duas unidades tectono-estratigráficas distintas: a "Unidade dos gnaisses da Foz do Douro" (UGFD) (BORGES *et al.*, 1985, 1987; MARQUES *et al.*, 2000) e uma unidade essencialmente constituída por metassedimentos (BORGES *et al.*, 1985; NORONHA & LETERRIER, 1995; LETERRIER & NORONHA, 1998; NORONHA, 1994 e 2000) a "Unidade de Lordelo do Ouro" (ULO). Os ortognaisses da UGFD (BORGES *et al.*, 1985, 1987; MARQUES *et al.*, 2000) contactam a NE e SW com formações metassedimentares muito dobradas (ULO) (BRAVO & ABRUNHOSA; BORGES *et al.*, 1985, 1987; MARQUES *et al.*, 1994, 2000) sendo nítida a discordância entre as foliações presentes nos gnaisses e nos metassedimentos. As sequências metassedimentares são essencialmente constituídas por

micaxistos a que se associam, por vezes, anfíbolitos e rochas calcossilicatadas. Como os metassedimentos da ULO (BRAVO & ABRUNHOSA; BORGES *et al.*, 1985, 1987; MARQUES *et al.*, 1994, 2000) exibem uma xistosidade anterior às foliações presentes nos ortognaisses assume-se que o UGFD (BRAVO & ABRUNHOSA, 1978) e, bem assim, o CMFD (NORONHA, 1994; NORONHA & LETERRIER, 1995; MARQUES *et al.*, 2000) correspondam à faixa pré-câmbrica da Zona Ossa Morena. A datação das rochas da faixa litoral do Porto é apresentada, no quadro 1.1.

Quadro 1.1 – Principais datações isotópicas do Complexo Metamórfico da Foz do Douro (VIEIRA DA SILVA., 2001.)

LITOLOGIA	LOCALIZAÇÃO	IDADE/MÉTODO	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA
Granito	Castelo do Queijo (Porto)	292 ± 5 Ma (Rb/Sr, biot.) ¹	Mendes (1967/1968)
Gnaiss Biotítico	Foz do Douro (Porto)	567 ± 6 Ma (U/Pb, Zr)	Leterrier & Noronha (1998)
Gnaiss Leucocrata de Tendência Ocelada	Foz do Douro (Porto)	607 ± 17 (U/Pb, Zr)	Leterrier & Noronha (1998)
Anfibolitos	Foz do Douro (Porto)	1,05 Ga (idade modelo de Sm/Nd, RT)	Leterrier & Noronha (1998)

¹ Idades recalculadas a partir de constantes actualizadas e publicadas em SERRANO PINTO (1985b); RT – Rocha Total

1.1.3 Rochas Sedimentares

As rochas sedimentares na Foz do Douro, são o conjunto essencialmente constituído por rochas detríticas que constituem os diferentes tipos de depósitos pós-pleiocénicos e que são, no essencial, compostas por material herdado e resultante da erosão das rochas ígneas e metamórficas mais antigas (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003).

Os aterros recentes (at) encontram-se principalmente entre a Circunvalação e a foz do rio Douro e que serviram, nomeadamente para a construção das avenidas junto ao mar, e na ligação entre o Farol de S. Miguel-o-Anjo e o Forte de S. João Batista na Foz (figura 1.2).

O quaternário antigo (Q) é a unidade onde se incluem os depósitos de origem marinha da faixa litoral existente na Foz do Douro e Nevogilde. São depósitos essencialmente arenosos mas com muitos seixos rolados que correspondem a praias antigas (terraços marinhos) e que comprovam processos ligados a regressão (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003).

O quaternário antigo e pliocénico recente (PQ) segundo ARAÚJO (1991) e CARVALHO (1992) são os depósitos constituídos por areias grosseiras e cascalhos de origem fluvial.

1.2 Geomorfologia do Porto

“Orograficamente o Porto assenta numa série de colinas coroadas de planaltos, de maior altitude a nordeste baixando suavemente em direcção ao oceano e à foz do Douro, e de modo abrupto para o lado do rio” (CARRINGTON DA COSTA, 1938).

Com efeito a cidade do Porto está situada numa região onde a plataforma litoral, considerada como uma superfície de aplanamento de origem subaérea (FERREIRA, 1983), corresponde a um conjunto de patamares escalonados, descendo para o mar a partir de uma linha de relevo “o relevo marginal”, o qual, na área da cidade se eleva a partir dos 80 metros (ARAUJO, 1991).

A geomorfologia da cidade não pode deixar de estar ligada aos sistemas de fracturação gerados aquando dos movimentos hercínicos e dos muitos rejogos que as fracturas então geradas sofreram até aos nossos dias. Isto é, a morfologia da cidade tal como hoje a temos não é mais do que o resultado de uma muito longa modelagem que teve o seu início, logo a seguir ou já mesmo no fim da orogenia hercínica, já lá vão cerca 270 Ma (NORONHA, 2005). Também a evolução paleoclimática foi determinante. Sendo, a partir de determinada altura, os granitos de duas micas as principais rochas aflorantes elas registaram processos de meteorização variáveis em função do clima dominante do regime hidrodinâmico (não é por acaso que as zonas mais caulinizadas supergenicamente estão em zonas mais planas e onde ocorrem alinhamentos de fractura). Os depósitos que constituem os terraços fluviais são ricos em caulinite o que sugere que foram formados ou sofreram uma alteração em condições de clima quente e húmido (ARAUJO, 1990).

Na cidade verifica-se que as orientações dos principais alinhamentos de fracturas são ENE-WSW a NW-SE, bem como as orientações mais tardias NNE-SSW a NS que são as mais marcadas. A direcção das diaclases medidas em locais distribuídos pelos afloramentos graníticos revela como sistemas principais os de orientação NE-SW (N30° a N60°E), que é o mais marcado, e ENE-WSW a NW-SE (N100° a N140°E) (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003). Ora foram estes os alinhamentos preferenciais para a referida modelagem da morfologia do Porto. A linha de costa é subparalela ao grande acidente NNW-SSE que é a falha Porto-Tomar. O rio Douro é o responsável pelo vale estreito e profundo visível em toda a marginal e que se prolonga até à Foz, com vertentes íngremes e elevadas que apresentam em alguns pontos altitudes da ordem dos 80 metros, como na zona da ponte de D. Maria I, e de 70 metros nas proximidades da ponte da Arrábida, factos que não são normais para um rio já próximo da sua foz.

Na realidade numa região com as características das do Porto torna-se difícil a caracterização morfológica, por um lado porque não são evidentes formas de relevo significativas e por outro lado, porque corresponde a uma área intensamente ocupada, em que as características naturais foram fortemente alteradas pela acção do homem.

1.3 Tectónica e Sismicidade da cidade do Porto

A unidade hercínica da Península Ibérica é caracterizada pela existência de várias Zonas Geotectónicas, com características paleogeográficas, tectónicas, metamórficas e plutónicas distintas, que se dispõem paralelamente às linhas estruturais da cadeia hercínica (JULIVERT & col. 1974).

Como refere NORONHA (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO - GEOLOGIA, SISMICIDADE E GEOMORFOLOGIA - MAIO 2005) a Cidade do Porto, situa-se essencialmente na Zona Centro-Ibérica. Contudo, como o que se designa por ZCPT, que marca o limite entre a Zona Centro-Ibérica (ZCI) e a Zona de Ossa Morena (ZOM), passa pela zona da Foz do Douro, geologicamente considera-se que a cidade se situa no limite entre aquelas duas zonas. Na área da cidade, devido ao seu posicionamento geotectónico só são cartografáveis as estruturas relacionadas com as fases F1 e F3 hercínicas (NORONHA *et al.*, 1979) (figura 1.2).

Como já foi referido há a distinguir os terrenos pertencentes à ZCI e os da ZOM separados pela zona de cisalhamento Porto – Tomar (ZCPT), activa desde F1 (1ª fase de deformação hercínica) e que durante F3 (3ª fase de deformação hercínica) deu lugar a um desligamento direito (RIBEIRO & col 1980). Na área correspondente à cidade do Porto os metassedimentos da ULO registam as deformações de ZOM e os metassedimentos do CXG as da ZCI.

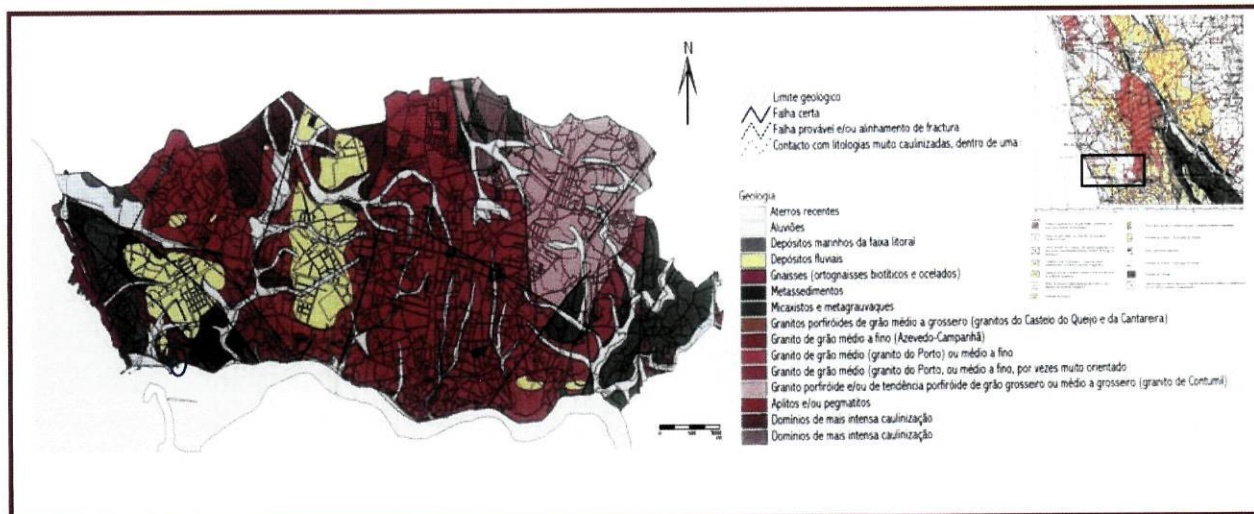


Fig. 1.2 – Adaptação da folha geológica da CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO (2003). No canto superior direito encontra-se representado o enquadramento geológico da cidade do Porto num excerto retirado da folha 1 da Carta Geológica de Portugal à escala 1:200000. 0 – Local do Farol de São Miguel-o-Anjo na Foz do Douro.

De referir que nos terrenos da ZOM, que são representados pelo que se designou por "Complexo Metamórfico da Foz do Douro" é possível reconhecer efeitos de deformações ante-hercínicas quer nos metassedimentos quer nos ortognaisses, além dos efeitos devidos às acções de F1 e F3 (NORONHA *et al.*, 1979); estas últimas responsáveis, respectivamente, pela foliação N120°E subvertical que corresponde a uma

clivagem de plano axial de dobras cujo eixo tem uma orientação WNW, com pendor variável, e por cisalhamentos N120°E a N130°E, mais marcado nos gnaisses leucocratas ocelados.

Concretamente e no que diz respeito à fase F3 da deformação hercínica (NORONHA *et al.*, 1979), fase que correspondeu a tensões compressivas máximas orientadas NE-SW, além de responsável por dobramentos e pelos cisalhamentos NW-SE e ENE-WSW implicou também fendas de tracção NE-SW e NNE-SSW registadas nomeadamente nos maciços graníticos de duas micas sintectónicas relativamente a F3. Nestas últimas instalaram-se, por exemplo, os filões aplitopegmatíticos. Posteriormente a F3 actuaram as fases terminais hercínicas, sob a acção de uma tensão compressiva máxima N-S que implicou o rejogo das fracturas geradas, principalmente, durante o período terminal de F3. Foi neste período que o sistema frágil NNE-SSW atingiu maiores proporções (RIBEIRO & PEREIRA, 1992). Do estudo dos principais alinhamentos observados verifica-se que estão representadas as orientações ENE-WSW a NW-SE, bem como as orientações mais tardias NNE-SSW a NS. A direcção das diaclases medidas em 23 locais distribuídos pelos afloramentos graníticos revela como sistemas principais os de orientação NE-SW (N30° a N60°E), que é o mais marcado, e ENE-WSW a NW-SE (N100° a N140°E) (CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003).

Os registos da sismicidade histórica e instrumental mostram que a cidade do Porto se situa numa região de sismicidade moderada a baixa. O potencial para a rotura sísmica de uma falha à superfície é um factor importante, na medida em que a maioria das estruturas não suporta eventuais deslocamentos de ordem decimétrica a métrica, impostos pelo movimento de uma falha no maciço de fundação. Por outro lado, considerando que as taxas de deslizamento sísmico das falhas activas em Portugal (CABRAL, 1993, 1995 e NORONHA, 2005) se situam entre valores da ordem de 0,01 a 0,001 mm/ano, estima-se que um sismo de magnitude 6 (seis) teria na região do Porto um intervalo de recorrência entre 10 000 e 100 000 anos. O que significa que é muito reduzida a probabilidade de ocorrência de um sismo de magnitude 6 na região do Porto e ainda mais reduzida a probabilidade desse sismo provocar um deslocamento da respectiva falha à superfície.

1.4 Classificação petrográfica e química

No contexto dos factores normalmente assinalados como susceptíveis de facilitar a alteração diferencial das rochas granitóides, é possível distinguir quatro factores principais: a composição químico-mineralógica, os aspectos texturais, a fracturação e, intimamente associados aos dois anteriores, a permeabilidade e a porosidade.

Embora seja difícil encarar isoladamente a actuação de qualquer um deles, uma vez que a menor ou maior alterabilidade dos materiais resulta provavelmente do seu jogo simultâneo, vamos analisar o contributo parcial destes elementos.

Com efeito, é possível definir vários tipos de granitóides que para além de outras características, apresentam diferenças significativas ao nível químico-petrográfico. Estas diferenças traduzem-se por variações na percentagem dos minerais que os constituem (essencialmente silicatos de diferentes grupos isoestruturais), permitindo definir escalas de vulnerabilidade à meteorização, de acordo com os minerais definidos por GOLDICH (1938).

Partindo destes minerais e conhecendo a composição de diferentes granitóides, é possível compreender o porquê da sua maior ou menor estabilidade, desde que se assuma, teoricamente, que todos os outros factores (endógenos e exógenos) são idênticos. Assim, em termos gerais, poderíamos salientar que os granitos mais resistentes são necessariamente pobres em minerais máficos e plagioclases cálcicas e intermédias, apresentando quantitativos importantes de feldspatos alcalinos (feldspato potássico e albite) e quartzo.

Concretizando um pouco este aspecto, gostaríamos no entanto de avaliar, ainda que sumariamente, a influência que a composição exerce sobre a alterabilidade de alguns tipos de granitóides. Utilizando uma classificação simplista, sabemos que o grau de resistência dos geomateriais diminui segundo a série granito alcalino/calco-alcalino/granodiorito, o que em parte pode ser atribuído às suas características petrográficas, principalmente tendo em conta o teor de minerais essenciais.

Relativamente ao conteúdo em quartzo, as variações detectadas entre os granitóides em questão não são geralmente muito significativas, embora seja possível verificar uma diminuição da sua percentagem dos dois primeiros para o último termo. Diferenças mais importantes registam-se, contudo, no tipo de feldspato (s.l.) presente: enquanto o granito alcalino é fundamentalmente constituído por feldspato potássico e albite (devendo esta última corresponder a percentagens superiores ou iguais a 90% da composição global das plagioclases, segundo a classificação de JUNG & BROUSSE, 1959), que se destacam entre os minerais mais estáveis na série de GOLDICH (1938), já o calco-alcalino possui teores de plagioclase mais elevados, dominando os termos cálcicos e intermédios numa percentagem que aumenta para os granodioritos. Também a presença de biotite em termos relativamente mais elevados no contexto dos granitos calco-alcalinos e granodioritos, constitui um factor de fraqueza. Efectivamente, devido à sua estrutura, este filossilicato facilmente sofre expansão de volume por hidratação, o que contribui, como a plagioclase, para a ruptura da rocha. É lógico que a composição química ao reflectir a associação de minerais presentes, regista igualmente variações importantes (quadro 1.2). Estas mais uma vez reafirmam a sequência de alterabilidade estabelecida, sendo particularmente notória a diferença de SiO_2 para os três granitóides. Se considerarmos que, segundo RONDEAU (citado por FERREIRA, 1978), o teor de sílica é um factor dominante no controle da resistência das rochas, estes dados quase seriam por si só, suficientes para justificar a maior vulnerabilidade dos granitos calco-alcalinos e granodioritos. De qualquer modo, é também importante registar o progressivo aumento do Al_2O_3 , FeO , MgO e CaO do primeiro para o terceiro termo,

elementos que parecem exercer forte influência, promovendo maior instabilidade dos materiais (GALOPIM DE CARVALHO 1997).

	A			B	
	G. Alcalino	Calco-Alcalino	Granodiorito	Granito	Granodiorito
SiO ₂	71,25±4,27	65,57±2,77	57,82±1,06	73,86	66,88
Al ₂ O ₃	15,42±2,06	15,83±2,57	16,21±0,86	13,75	15,66
Fe ₂ O ₃	1,34±1,24	0,57±0,35	1,48±0,64	0,78	1,33
FeO	1,89±1,58	3,84±1,47	6,14±1,27	1,13	2,59
MnO	vest-0,09	0,07±0,05	0,07±0,02	0,05	0,07
MgO	vest-1,11	0,89±0,70	2,81±0,56	0,26	1,57
CaO	1,19±0,83	2,26±0,53	6,10±0,61	0,72	3,56
Na ₂ O	4,32±1,18	4,12±1,15	3,22±0,77	3,51	3,84
K ₂ O	4,12±2,46	4,54±1,38	3,481±0,97	5,13	3,07
TiO ₂	vest-0,98	0,70±0,33	1,741±0,60	0,20	0,57
P ₂ O ₅	0,38±0,20	0,341±0,14	0,611±0,12	0,14	0,21
H ₂ O	1,00±0,37	0,84±0,30	0,811±0,15	0,47	0,65

Quadro 1.2 — Composição química média de granitos alcalinos, calco-alcalinos e granodioritos. A- Valores estabelecidos com base nos dados de ASSUNÇÃO (1962), para vários granitóides de Portugal. B-Valores médios extraídos de J. DERCOURT & J. PAQUET (1986).

Na sua tese de mestrado sobre *Alteração das Rochas Graníticas do Norte e Centro de Portugal*, BEGONHA (1989) defende que a composição da rocha mãe pode constituir um factor a considerar, embora limite a sua importância aos primeiros estádios de meteorização, o que nos parece bastante provável. Com efeito, pensamos que a composição poderá actuar principalmente sobre a velocidade de alteração de um material fresco, desenvolvendo-se tanto mais rapidamente quanto mais rico ele for em minerais de fractura fácil, embora seja necessário ter em conta a influência do meio. No seguimento do processo, admite-se que factores associados principalmente à facilidade de infiltração e movimento de soluções passem a assumir um papel dominante.

A textura de uma rocha, encarada em termos globais como referente ao seu aspecto macro e microscópico, envolve quatro elementos principais: o arranjo ou orientação dos minerais, a sua forma, tamanho e perfeição, a heterogeneidade e, relacionada com esta, a dimensão do grão. O arranjo dos minerais, como a própria palavra indica, refere-se à sua distribuição no contexto do material rochoso. O tamanho, forma e perfeição da rede cristalina dos minerais, pode também condicionar o seu grau de meteorização. Em relação à primeira variável, salienta-se como regra geral a mais fácil conservação daqueles que apresentam maior calibre, o que está relacionado com o facto do processo de alteração actuar fundamentalmente como actividade de superfície. Assim, como a área ocupada por vários cristais de pequena dimensão é maior do que a que ocupa um único cristal com o mesmo volume, estes últimos tendem a resistir melhor. O *Granito*

do Porto é segundo BEGONHA (2001) um granito de grão médio de duas micas com textura hipidiomórfica granular, por vezes com tendência porfíroide.

A presença de megacristais de feldspato potássico relativamente são, no seio de massas rochosas alteradas, pode em parte associar-se a este princípio, embora a sua composição exerça provavelmente um papel mais importante. A forma geométrica apresentada pelos diferentes minerais pode também influenciar a sua estabilidade. Por exemplo, enquanto os cristais de hábito lamelar e tabular (caso das micas e plagioclases) geralmente se alteram com maior facilidade, já os prismáticos, como o quartzo e a ortoclase, evidenciam maior resistência. Por fim, salienta-se que a presença de defeitos na rede cristalina, nomeadamente imperfeições resultantes da substituição de elementos químicos, tendem a facilitar a destruição desta, promovendo a alteração do mineral. A clivagem dos minerais também influencia a sua estabilidade e a sua alterabilidade.

A heterogeneidade, expressa através da relação entre o tamanho médio dos componentes de maior e menor dimensão que constituem as rochas, é também responsável pela sua alterabilidade diferencial. Intimamente associada à textura dos materiais (em senso restrito), esta relação diminui para os granitóides equigranulares, ou seja, constituídos por grãos de dimensão aproximadamente igual, enquanto apresenta valores elevados para os porfíroides. Constituindo a heterogeneidade um factor de fraqueza, estes últimos são por isso mais instáveis. Relativamente ao tipo de grão, refira-se a maior vulnerabilidade dos granitos de grão grosseiro em relação aos de granularidade média e fina, pois, menos coesos e compactos (o que se vai traduzir por valores de porosidade mais elevados) facilitam a circulação das águas, induzindo o progressivo aumento da meteorização (SUGUIO, 1980).

Quando analisámos a importância da composição dos granitóides no contexto do processo de alteração, vimos que os termos alcalinos eram bastante mais resistentes que os calco-alcalinos e granodioritos. Sublinhando no entanto a associação de factores para explicar o seu comportamento desigual, é conveniente salientar que às diferenças químico-mineralógicas se associam frequentemente diferenças texturais. Como refere FERREIRA, (1978, p.12), "(...) os granitos não porfíroides de grão médio a fino são, segundo as mais recentes sínteses geológicas, quase sempre de tendência alcalina e de duas micas, enquanto os granitos porfíroides de grão grosseiro são geralmente calco-alcalinos e biotíticos, por vezes de composição claramente granodiorítica".

1.5 Meteorização

A meteorização é o conjunto de processos que originam a desintegração e a decomposição das rochas e seus minerais por acção dos agentes atmosféricos e biológicos. A compreensão dos mecanismos de meteorização das rochas e respectivos minerais tem sido objecto de estudo de vários autores (WIELAND *et al.* 1988; ACKER & BRICKER, 1992; WHITE & BRANTLEY, 1995; STEFÁNSSON *et al.*, 2001),

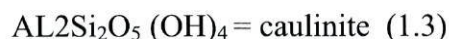
principalmente a relação entre o ciclo geoquímico dos elementos da biosfera e os minerais, considerando-se que é através deste ciclo que os constituintes químicos intervenientes no processo de meteorização entram nas soluções. No entanto, algumas dificuldades permanecem, apesar dos estudos já publicados, sendo difícil de quantificar os factores que interferem no processo e de definir qual o real contributo de cada um deles para a destruição das rochas. A diversidade deste conjunto de processos permite a existência do conceito de grau de meteorização, que corresponde ao estágio de evolução do processo de meteorização da rocha em determinado momento, em função das propriedades físicas, químicas, mineralógicas e geotécnicas que a rocha apresenta. A meteorização ocorre em ambiente exógeno, sob influência dos agentes da geodinâmica externa, acontecendo como resposta por parte das rochas à procura do equilíbrio perante as novas condições ambientais a que passam a estar sujeitas à superfície da Terra. Todos os materiais expostos num afloramento de uma rocha estão sujeitos a processos de meteorização destrutivos, de natureza física, química e biológica.

Segundo AIRES-BARROS (1991), o grau de meteorização de uma rocha é função de factores intrínsecos, dependentes do tipo de rocha (textura e composição) e de factores extrínsecos determinados pelo meio em que se processa a alteração. Acresce que, dentro de um mesmo maciço rochoso, diferentes afloramentos podem exibir diversos graus de meteorização, resultado não do factor tempo mas de factores intrínsecos e extrínsecos a esse maciço, como distintos graus de fissuração e de fracturação. As modificações químicas e mineralógicas, que se verificam durante o processo de meteorização, vão depender sobretudo das condições climáticas do local. Basicamente, estas modificações resultam do facto de os meios exógenos serem meios hídricos oxigenados onde prevalece a acção da água, do oxigénio e do dióxido de carbono que actuam sobre as rochas endógenas geradas em ambientes redutores a elevadas pressões e temperaturas.

1.5.1 Meteorização Química

Os processos químicos mais importantes são a hidrólise, a dissolução, a desidratação e hidratação, as soluções, as reacções de oxidação-redução e a carbonatação. KUHNEL (2003) afirma que as reacções químicas são facilitadas pelas acções físicas que promovem a ocorrência de movimentos migratórios e um aumento da superfície de reacção. Minerais com diferentes alterabilidades reagem de maneira distinta perante os agentes de meteorização. Pode haver remoção e destruição total de um mineral ou somente transporte e deposição, mantendo-se, neste caso, a estrutura cristalina original. Como exemplo, perante as mesmas condições ambientais, o quartzo, formado a pressões e temperaturas inferiores às da cristalização dos feldspatos, é praticamente insolúvel, enquanto que os feldspatos hidrolisam-se e transformam-se em minerais de argila ou mesmo em gibsita, minerais secundários identificados nos granitos meteorizados do Noroeste da Península Ibérica (SEQUEIRA BRAGA, 1988, BRILHA, 1992, BEGONHA, 1997, 2001a, SEQUEIRA BRAGA et al, 2002, BEGONHA & SEQUEIRA BRAGA, 2002).

Os feldspatos potássicos são mais resistentes à meteorização do que a plagioclase, exibindo de início apenas o desenvolvimento progressivo de um sistema de microfracturas e um reduzido aumento do empoeiramento da superfície dos cristais. Nas arenas, os grãos de feldspato potássico apresentam-se muito fracturados e as maclas de Carlsbad ou as polissintéticas de albite e periclina só são observáveis em alguns dos cristais. Os feldspatos potássicos transformam-se em caulinite durante o processo de meteorização química:



A plagioclase é o mineral que mais rápida e profundamente é meteorizado no granito. Observa-se de início na rocha meteorizada a fragmentação e por vezes a anastomose dos cristais, o empoeiramento generalizado devido à corrosão intensa das superfícies do tipo buracos e sulcos de corrosão segundo BAYNES & DEARMAN (1978) e à formação de caulinite.

A biotite e a moscovite sofrem dissolução ou na superfície basal paralela à clivagem ou nos contornos destas (NAGY, 1995). A evolução do processo é feita inicialmente nas orlas dos grãos passando nas fases seguintes para a zona central. A separação entre as camadas vai aumentando, permitindo trocas iónicas. Num estado já muito avançado, surgem partículas de argila que vão ocupar estes espaços (FORDHAM, 1990). SEQUEIRA BRAGA & PAQUET (1987), SEQUEIRA BRAGA (1988), BEGONHA (1997, 2001a) e SEQUEIRA BRAGA *et al.* (2002) observaram que, durante o processo de meteorização dos granitos da região Noroeste de Portugal, os cristais de biotite apresentavam afastamento gradual dos folhetos seguido de enrolamento e encurvadura dos cristais em forma de amêndoa. Verificaram ainda que a biotite se meteoriza por dois processos distintos, transformando-se directamente em caulinite ou em gibsita, ou transformando-se primeiro em caulinite a qual posteriormente evolui para gibsita. BEGONHA (1997, 2001a) e SEQUEIRA BRAGA *et al.* (2002) observaram o afastamento gradual dos folhetos de cristais de moscovite em arenas de *Granito do Porto*, bem como os dois processos de evolução mineralógica anteriormente descritos para a biotite.

O quartzo, apesar de ser considerado um mineral quase inerte quimicamente, sofre alterações se sujeito a condições termais ou tectónicas. É normalmente muito resistente à lixiviação por não conter na sua rede cristalina, tetraédrica fechada, os catiões Na^+ , K^+ ou Ca^{2+} . Tal como acontece nos minerais anteriores, o mecanismo de dissolução é controlado por reacções superficiais, aumentando a sua taxa de dissolução com a diminuição do pH da solução, exibindo então figuras típicas de corrosão. Durante a meteorização, os cristais de quartzo desenvolvem uma rede de fracturas cada vez mais intensa.

1.5.2 Meteorização Física

Os principais processos de meteorização física são a acção das águas de circulação, as variações volumétricas devido a efeitos térmicos, a expansão por descompressão, a expansão por congelação da água retida nos poros e fissuras, a expansão resultante da cristalização de minerais de sais solúveis na rede porosas e as acções mecânicas exercidas pelos seres vivos.

Em resultado destes processos, a rocha sofre uma fragmentação progressiva preferencialmente ao longo de superfícies anisotrópicas como, por exemplo, juntas, fissuras intra, inter e transcristalinas, planos de clivagem dos minerais (feldspatos e micas nos granitos) e planos de macla. A meteorização física traduz-se, consequentemente, num aumento de porosidade e de variação no volume que leva a uma diminuição das resistências mecânicas.

Devido às altas pressões a que as rochas magmáticas intrusivas, como os granitos, foram sujeitas durante o processo de arrefecimento e cristalização do magma, a porosidade tende a ser mais baixa do que nas rochas sedimentares e metamórficas. Contudo, no granito, a meteorização é rápida, consequência de uma drenagem eficaz no interior dos maciços rochosos, devido à existência não só de um sistema de diaclasamento do maciço, mas também de uma rede porosa da rocha, essencialmente constituída por microfissuras homogéneas e bem interligadas, proporcionando o contacto directo de um elevado número de minerais com os agentes de lixiviação.

No Noroeste da Península Ibérica, à drenagem interna dos maciços acresce uma forte drenagem exterior dos mesmos, em resultado das características topográficas e climáticas da região. Efectivamente, a existência de forte pluviosidade e de um relevo caracterizado por uma rede hidrográfica densa estabelecida em vales abertos, intercalados com elevações de declive acentuado, conduziu a maciços rochosos intensamente meteorizados e perfis de meteorização que atingem frequentemente os 40 metros de profundidade (SEQUEIRA BRAGA, 1988; SEQUEIRA BRAGA *et al.*, 1989; SEQUEIRA BRAGA *et al.*, 2002).

1.5.3 Meteorização Físico-Química

A evolução físico-química dos granitos em climas temperados (caso do Noroeste peninsular) traduz-se, em geral numa desagregação forte (arenização) devido à alteração diferencial dos minerais constituintes. SEQUEIRA BRAGA (1988) designou por arena o produto final da alteração meteórica *in situ* do granito, caracterizada por uma meteorização do tipo esquelética e que apresenta a estrutura da rocha-mãe preservada, constituindo solos residuais graníticos ou saprólitos.

Os perfis de meteorização dos granitos desta região caracterizam-se por uma grande heterogeneidade vertical e horizontal independente do tipo de granito. A frente de meteorização na base dos perfis é muito irregular e não é paralela à superfície topográfica. A espessura das arenas difere de local para local. Blocos resistentes de rocha meteorizada compacta ocorrem em alguns dos perfis, mas não em todos (SEQUEIRA BRAGA, 1988; BEGONHA, 1997, 2001a; SEQUEIRA BRAGA *et al.*, 2002).

1.6 O Granito e a sua susceptibilidade às agressões

A exploração de pedreiras com vista à edificação de monumentos históricos, particularmente de granito, incidia em zonas superficiais mais acessíveis nas quais a rocha já se encontrava moderadamente alterada permitindo maior facilidade no seu trabalho pelos artífices e pedreiros. Este facto explica a razão pela qual, na maioria dos casos estudados, as pedras utilizadas em construção já possuem diversos graus de meteorização herdados das pedreiras, exibindo uma alterabilidade e uma susceptibilidade ao eventual desenvolvimento de patologias da pedra (ALMEIDA, 2006).

A deterioração ou degradação desenvolve-se nas pedras utilizadas nos edifícios em resultado dos efeitos das técnicas de extracção nas pedreiras, da acção de factores de natureza antropogénica como a poluição atmosférica e a contaminação das águas freáticas e da acção de agentes climáticos, principalmente a chuva, a temperatura e a humidade relativa do ar. A construção em pedra implica a existência de superfícies interiores e exteriores sujeitas a diferentes concentrações de humidade, temperaturas, deformações, tensões, influências físico-químicas dos materiais de construção e diferentes graus de poluição atmosférica (ZEHNDER, 1979). Depois de transformadas e aplicadas em obra, as rochas passam a sofrer a acção de agentes de deterioração, designadamente quando aplicadas em exteriores onde se fazem sentir os efeitos das chuvas ou do gelo, das amplitudes térmicas, da ascensão de soluções salinas por capilaridade, do nevoeiro salino, do vento e onde se intensificam os efeitos dos agentes poluentes como as chuvas ácidas existentes na atmosfera das áreas urbanas e industriais.

Segundo DELGADO RODRIGUES (1989), este processo é contínuo, complexo e inexorável, dependente da natureza e da localização da pedra. Pequenas diferenças nas condições ambientais ou nas características da pedra podem provocar alterações no mecanismo e velocidade do processo de deterioração.

O estudo da deterioração da pedra pode ser subdividido em diversos domínios de investigação nomeadamente as causas, processos e tipos de degradação; avaliação da qualidade e do estado de conservação da pedra; condições ambientais em que se inserem os edifícios ou construções em pedra; estudo e resultados de métodos e técnicas laboratoriais; estudo dos métodos e produtos de limpeza conservação e tratamento da pedra com o objectivo de minimizar ou mesmo impedir os processos de deterioração. Qualquer intervenção num edifício ou monumento deverá ser precedida de

um diagnóstico do estado de conservação da pedra que incluía pesquisas para determinação das propriedades dos materiais geológicos e dos processos de deterioração. É um requisito indispensável para entender os complexos mecanismos actuais envolvidos nas deteriorações. Em edifícios graníticos, o estudo das propriedades da rocha deverá ainda incluir os diferentes graus de meteorização, uma vez que as pedras utilizadas nas construções apresentavam sistematicamente meteorização herdada das pedreiras (CASAL PORTO, 1989; LNEC, 1990, 1991a; DELGADO RODRIGUES, 1993a, 1993b, 1996; SEQUEIRA BRAGA *et al.*, 1993; BEGONHA & SEQUEIRA BRAGA, 1993, 2002; ALVES & SEQUEIRA BRAGA, 1995; VICENTE, 1996; DELGADO RODRIGUES & COSTA, 1996, ALVES *et al.*, 1996, BEGONHA 1997, 2000, 2001a, 2004a, 2004b; ALVES, 1997; OLIVEIRA, 2001; SIMÃO, 2003). Efectivamente, a exploração de pedreiras de granito com vista à edificação de monumentos históricos incidia em zonas superficiais, mais acessíveis, nas quais a rocha já se encontrava moderadamente meteorizada, permitindo uma maior facilidade no seu trabalho pelos artífices e mestres pedreiros.

NASCIMENTO (1970) refere que a alterabilidade das rochas aplicadas em edifícios é um parâmetro que deve ser considerado por ter efeitos negativos na segurança, economia e estética destes. Estudos de deterioração realizados em rochas ígneas (SILVA & SIMÃO, 1995; SIMÃO, 2003) demonstraram que, mesmo rochas aparentemente pouco susceptíveis à alteração, podem apresentar problemas de degradação rápida quando submetidas a ambientes poluídos quimicamente agressivos. Estas modificações traduzem-se essencialmente na perda de qualidade da rocha, considerando-se aconselhável que este tipo de estudos represente um indicador de qualidade da rocha ornamental ou de construção e que, sempre que possível, seja incluído entre os parâmetros de caracterização da rocha e nas recomendações de utilização e aplicação.

O “*Granito do Porto*” ocorre em diferentes estados de alteração, conduzindo a modificações petrográficas e químicas do material rochoso, assim como a alterações do comportamento físico, em termos de densidade, porosidade e resistência. No maciço rochoso granítico verifica-se que a alteração é mais intensa ao longo das discontinuidades (diaclasses abertas, falhas e/ou zonas tectonicamente afectadas). Segundo BEGONHA (1989), o grau de fracturação de uma rocha desempenha o principal papel na evolução do processo de alteração do “*Granito do Porto*”.

As cores predominantes do “*Granito do Porto*” são as cores cinzentas, correspondendo à rocha sã, e a cor bege amarelado, correspondendo à rocha mais alterada. A zona de alteração estende-se até uma profundidade aproximada de 40 metros segundo BEGONHA (2001), a partir da qual o granito tende a apresentar uma coloração cinzenta. Segundo BEGONHA (2001) “*o estádio inicial de meteorização do granito do Porto, materializado pela rocha meteorizada compacta, caracteriza-se pelos seguintes minerais de neoformação: interestratificados vermiculíticos e cloríticos não expansivos, caulinite e gibsita*”.

2. AMOSTRAGEM E METODOLOGIA

2.1 Amostragem

A extracção de amostras é sempre traumática para os edifícios monumentais, devendo ser cuidadosamente programada no que respeita quer aos pontos em que é possível fazer-se a sua extracção, quer às dimensões das amostras a serem extraídas, as quais não podem ser grandes, mas também não excessivamente reduzidas, porque o ensaio pode não resultar suficientemente representativo, em consequência da heterogeneidade das alvenarias.

A amostragem é um procedimento definido pelo qual é recolhida uma parte de uma substância, material ou produto, que proporcione uma amostra representativa do todo para ensaio. A amostragem é um aspecto importante que condiciona decisivamente o sucesso e a representatividade dos estudos de caracterização física e química. A escolha dos locais de amostragem é efectuada após uma cuidada inspecção inicial dos monumentos. A extracção das amostras antes e após a remoção da amostra dos monumentos será acompanhada dum registo fotográfico e a respectiva descrição dos aspectos observados. Devem ser representativas dos fenómenos de degradação que se verificaram relativamente:

- À exposição aos pontos cardeais;
- Às zonas deslavadas e zonas não deslavadas pela precipitação (chuva);
- Aos diversos tipos de litologias presentes;
- Às zonas muito pouco degradadas.

No laboratório, as amostras são cuidadosamente observadas à lupa binocular para verificar e registar aspectos particulares, como a presença de materiais fibrosos ou cerâmicos. Nos casos em que as amostras são compostas por várias camadas, estas deverão ser separadas com o auxílio da lupa binocular para estudo posterior.

As amostras são desagregadas cuidadosamente com o auxílio inicialmente de um martelo de borracha, e posteriormente, de um almofariz para não partir os agregados existentes e separadas em diferentes fracções para serem analisadas pelas técnicas de caracterização seleccionadas.

2.2 Metodologia

Qualquer estudo que pretenda diagnosticar a deterioração de um monumento construído em granito, pressupõe a aplicação de uma metodologia que atenda à

identificação das causas que conduzem ou conduziram ao aparecimento das deteriorações e também ao grau de gravidade do problema.

Para isso, o estudo terá de atender a pelo menos três aspectos importantes:

- Características das rochas presentes no monumento;
- Origem dos agentes que conduzem à deterioração;
- Mecanismos de deterioração, ou seja, a forma como os agentes de deterioração intervêm no processo.

Para além do trabalho de cartografia das deteriorações, que pretende estabelecer um quadro de deteriorações, do trabalho de reconhecimento e dimensão das diferentes formas de deterioração, é imprescindível proceder também ao estudo complementar de ensaios físico-mecânicos e químicos, no sentido de se poder intervir ao nível das soluções para conservação e de diminuir ou até mesmo eliminar as deteriorações.

Assim, neste trabalho sobre o Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro, procedeu-se à obtenção de dados complementares de cariz físico-químico, dentro das limitações próprias a uma tese de mestrado e às condicionantes impostas pelas entidades responsáveis pelos monumentos.

Duas das propriedades que permitem definir as características das rochas são a textura e a mineralogia, pois possibilitam a obtenção de informação sobre os mecanismos de alteração que actuaram sobre as rochas. A fissuração, a porosidade e a permeabilidade aumentam durante a meteorização da rocha, sendo a formação de minerais argilosos secundários um processo comum, podendo, inclusive, a presença em grande quantidade destes minerais conduzir a uma rápida degradação das rochas ígneas quando estas são extraídas do seu meio natural (PINTO, 1993).

O comportamento das rochas, no que diz respeito à deterioração, é condicionado pela circulação interna de fluidos, daí o ter em atenção a textura, que relaciona as dimensões, a forma e o arranjo entre si dos minerais constituintes (TELES & BEGONHA, 1998). Referem estes autores que, hoje em dia, deverão também ser considerados os vazios, poros e fissuras, dada a sua grande importância no comportamento das rochas, nos campos da meteorização e deterioração. O tamanho dos poros é um factor de controlo na acção de capilaridade, pois determina o grau de alteração e a sua penetração profunda dentro da pedra. Associada a estas duas propriedades, a composição química influencia decisivamente o comportamento da pedra face aos agentes agressivos exteriores de meteorização e/ou de deterioração. E obtida com rigor, recorrendo a análises químicas.

Os métodos para determinar a mineralogia, a textura e a composição química, foram o microscópio estereoscópico binocular, a difracção de raios X (DRX) e a microscopia

electrónica de varrimento equipada com microanálise de raios X (MEV-EDS). A microscopia óptica de luz polarizada permite a identificação e quantificação dos minerais bem como a determinação da ordem por que se formaram. A DRX identifica e semi-quantifica os minerais presentes. O MEV identifica e analisa quimicamente os minerais.

2.2.1 Microscópio estereoscópico binocular

Este tipo de análise é um importante método para caracterizar as rochas quer do ponto de vista qualitativo, quer da análise da imagem.

A observação ao Microscópio estereoscópico binocular permite identificar alguns minerais e rochas ou o grupo a que pertencem e examinar macroscopicamente o seu estado de alteração. Possibilita ainda a análise de texturas na superfície dos grãos do agregado e a observação de algumas das suas características gerais, como o grau de rolamento e esfericidade. Sendo uma técnica relativamente expedita e pouco dispendiosa, é especialmente útil nas fases preliminares de um estudo, pois possibilita uma primeira caracterização geral dos materiais geológicos (rochas, sedimentos). As propriedades utilizadas na identificação de minerais com a lupa binocular são as mesmas que se utilizam em amostras de mão: cor, transparência, brilho, clivagem, fractura e dureza.

No trabalho prático realizado no Laboratorium do Visionarium foi utilizado o microscópio estereoscópico binocular (lupa) SMZ-168, que fornece uma clara imagem real 3-D com um conveniente zoom ampliação intervalo de 7,5 – 50x fornecidos pela combinação do sistema óptico Greenough e da norma 10x “super widefield eyepieces” (figura 2.1). A ampliação utilizada para a observação de amostras foi de 20x ($10 \times 2 = 20x$).

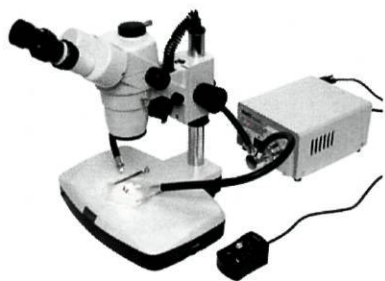
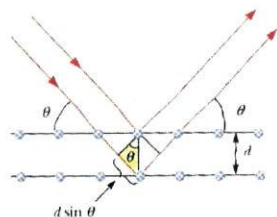


Fig. 2.1– Motic SMZ-168

2.2.2 Difracção dos raios X – DRX

Esta técnica, usada na identificação mineralógica das amostras FSMA 7 e FSMA 10, permite a identificação e semi-quantificação das fases minerais cristalinas. A DRX é primordial para identificar os minerais de menores dimensões, não observáveis no

microscópio óptico de luz polarizada. A amostra a ser analisada por difractometria de raios X é pulverizada previamente num almofariz, sendo assim constituída por milhares de grãos minerais com todas as orientações possíveis. No método difractométrico, utilizado neste trabalho, porta-amostras e detector de radiações X são sujeitos a rotações causadas por engrenagens independentes. Na posição inicial, o feixe de raios X é paralelo à superfície lisa da amostra e passa directamente para o detector. Quando ocorrem as condições geométricas da Lei de Bragg, o feixe difractado entra no detector, provocando uma resposta. O impulso assim gerado é amplificado e causa uma deflexão no registo difractométrico. No difractómetro de raio X, a informação é registada sob a forma de um gráfico de picos numa folha de papel. Cada pico apresenta uma determinada altura proporcional à sua intensidade, sendo a abcissa igual a um ângulo 2θ , em que o θ é o complemento do ângulo de incidência do feixe de raios X. Um dado pico corresponde a uma reflexão dos raios X, segundo uma determinada família de planos cristalográficos paralelos afastados de d (figura 2.2). A relação entre os valores de θ e de d é a equação traduzida pela equação de Bragg:



$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.1)$$

Fig. 2.2 – Lei de Bragg.

em que n é o número de ordem inteiro, e, λ , o comprimento de onda conhecido da radiação X utilizada no difractómetro.

O resultado da análise é apresentado sob a forma de um difractograma cujos picos, após comparação com fichas padrão de diferentes compostos, são atribuídos aos minerais presentes na amostra. A difracção de raios X não permite detectar fases minerais existentes na amostra em muita pequena quantidade.

2.2.3 Microscopia electrónica de varrimento (SEM)

As observações foram realizadas no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP) no microscópio modelo Jeol JSM-6301F/INCA Energy 350, equipado com microanálise por raios X (EDS-WDS). Todas as amostras foram revestidas a ouro, observadas e analisadas por electrões secundários a 10 keV ou a 15 keV e por períodos de tempo útil (livetime) iguais a 60 segundos.

Os microscópios electrónicos são instrumentos que permitem a observação com elevada resolução de amostras com características muito diferenciadas, utilizando, como radiação incidente, um feixe electrónico previamente acelerado. A construção da imagem em microscopia electrónica pode ser realizada, aproveitando diversas radiações provenientes da interacção entre o feixe electrónico incidente e a amostra,

sendo a natureza da informação obtida dependente dos processos físicos que estão na sua origem (figura 2.3).

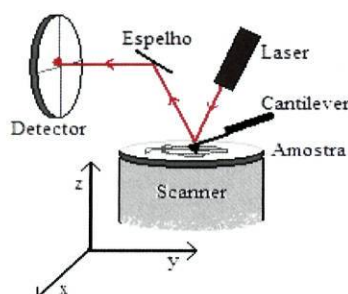


Fig. 2.3 – Interação entre o feixe electrónico incidente e a amostra no porta-amostras (figura do CEMUP).

Estudos de meteorização e/ou deterioração da pedra recorrem frequentemente à microscopia electrónica de varrimento, obtendo-se imagens sobretudo a partir de electrões retrodifundidos ou a partir de electrões secundários.

Os electrões retrodifundidos são os electrões emergentes da superfície da amostra com energia próxima da do feixe incidente, resultando de interações elásticas ou com perdas reduzidas de energia, mas forte desvio angular. As imagens obtidas em MEV, utilizando esta radiação, contêm informação essencialmente química (número atómico médio local) e topográfica (relevo da superfície da amostra). Os electrões secundários têm baixa energia (< 50 eV), resultando fundamentalmente dos processos de interação de electrões periféricos, quer com electrões primários (incidentes) quer com electrões retrodifundidos. Devido à sua baixa energia, provêm de uma vizinhança próxima do ponto de impacto do feixe primário e de uma profundidade máxima de algumas dezenas de Å. O seu número depende fortemente do ângulo de incidência do feixe primário (figura 2.4). Devido a estas características, as imagens realizadas com electrões secundários apresentam forte contraste topográfico, cumulativamente com a informação relativa às propriedades que afectam a emissão de electrões rectrodifundidos.

Esta técnica possibilita uma elevada resolução na observação das amostras, permitindo a identificação de minerais de sais solúveis e de partículas, com observação tridimensional dos hábitos em que ocorrem e dos minerais que formam o substrato, permitindo ainda a obtenção de espectros e de análises químicas quantitativas. Possibilita ainda o estabelecimento de associações entre os minerais de sais solúveis e as respectivas quantidades. Torna-se assim um método fundamental para relacionar o tipo de deterioração e os minerais de sais solúveis que a originam.

A microscopia electrónica de varrimento permitiu identificar os minerais de sais solúveis causadores das deteriorações verificadas na pedra do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro.

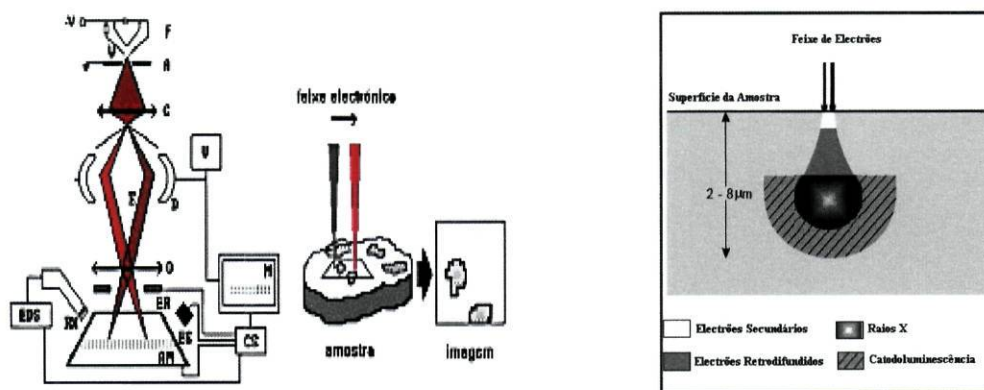


Fig. 2.4 – Estrutura de um microscópio electrónico de varrimento – SEM. D: detetores, CA: corrente da amostra, DX: raios X, ER: electrões retrodifundidos, ES: electrões secundários, CR: monitor do tubo de raios catódicos, A: amostra (figura do CEMUP).

2.2.4 Microscopia electrónica de varrimento a baixa temperatura – CryoSEM

As observações foram realizadas no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP) no microscópio electrónico de varrimento de alta resolução com facilidades de CryoSEM e microanálise por raios X: FE_SEM – JEOL JSM 6301F CryoSEM – Gatan Alto 2500 EDS – Oxford INCA 350 Energy.

Foi efectuada a Caracterização morfológica, microanalítica e microestrutural de amostras recolhidas no Farol de S. Miguel-o-Anjo por Microscopia Electrónica de Varrimento a baixa temperatura (CryoSEM) Microanálise por Raios X (EDS) e Análise de Padrões de Difracção de Electrões Retrodifundidos (EBSD). Todas as amostras foram revestidas a ouro, observadas e analisadas por electrões secundários a 10 keV ou a 15 keV e por períodos de tempo útil (livetime) iguais a 60 segundos. As amostras foram observadas e analisadas em superfície livre de amostras fixadas à temperatura do azoto líquido (LN2)

2.2.5 Espectroscopia de efeito Raman

A análise pontual aproveitando o efeito Raman é um método analítico não destrutivo. Existem aparelhos de análise de diferentes concepções contudo o mais utilizado para a análise de fases fluidas e sólidas contidas nos minerais é a microsonda com efeito Raman.

O efeito Raman consiste num fenómeno de variação de frequência de onda que acompanha a difusão da luz quando efectuada através de um meio material. Ao iluminar-se esse meio com uma radiação monocromática, recorrendo, por exemplo, a um raio laser, uma fracção dos fotões que constituem essa radiação é reflectida, outra é absorvida e uma parte muito pequena é difundida em todas as direcções. Como uma molécula poliatómica tem vários níveis de energia vibracional e por sua vez cada um

destes níveis está associado com correspondentes níveis rotacionais. O efeito Raman está relacionado com vibrações e rotações moleculares, embora seja um processo fundamentalmente ligado à difusão. Se a intensidade de radiação difundida em função da frequência for implantada num diagrama obtém-se de um lado e do outro da frequência excitante uma série de picos de fraca intensidade devidos ao efeito Raman. Obtém-se assim os picos Raman e o diagrama respectivo constitui o "*espectro Raman*".

A microsonda Raman consiste na associação de um microscópio de polarização, de um filtro óptico e de um sistema de detecção multicanal. Durante o funcionamento do micro-espectrómetro Raman a objectiva focaliza um feixe de raios laser sobre o composto a estudar e recolhe a luz difundida que é analisada pelo filtro óptico. Devido às suas características, este aparelho tem inúmeras aplicações, grande parte das quais no domínio dos geomateriais (figura 2.5).

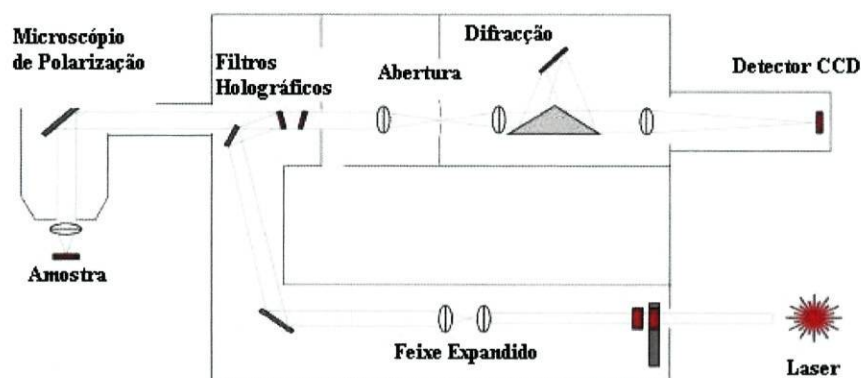


Fig. 2.5 – Esquema de funcionamento da microsonda de Raman. Detector de CCD (Charge-Coupled-Device).

A espectroscopia Raman foi realizada no Departamento de Geologia da universidade do Porto, com o espectrómetro Labram Dilor – Jobin Yvon-Spex., com uma potência de laser He-Ne de 20 mW, cuja radiação excitante é de 633 nm. Trata-se de um micro-espectrómetro da mais nova geração, com um sistema compacto e integrado Raman-laser para análises confocais e pontuais, incluindo fonte laser, microscópio confocal, óptica de transferência e filtragem, espectrómetro com duas redes de difracção, detector multicanal, electrónica para controle e software de aquisição e tratamento de dados.

3. DIAGNÓSTICO DA DETERIORAÇÃO DO GRANITO

3.1 Introdução

A pedra é um dos materiais que mais largo uso encontra na construção civil, sendo utilizada pelo homem desde tempos imemoriais. São de pedra os mais antigos monumentos que se conhecem, como os dólmenes ou antas, os cromlechs e os menires. Igualmente são de pedra muitos dos utensílios e ferramentas do homem “pré-histórico.”

As construções em pedra natural têm sido, desde sempre, ameaçadas por problemas de maior ou menor importância de degradação como consequência de uma série de acções físicas naturais. As agressões não são originadas por um elemento único nem por um mecanismo de alteração único.

Os fenómenos de alteração das pedras utilizadas na construção resultam de uma conjugação de factores, a que se dá tecnicamente o nome de “stress-corrosion” (sobreposição de acções químicas de corrosão que se dão sobre os danos causados pela tensão mecânica gerada por factores externos e internos). Para compreender os mecanismos de alterações das pedras, é necessário ter em conta diversas características: composição química, estrutura da pedra, propriedades mecânicas dos minerais que a compõem e do trabalho a que foi submetida (incluindo colocação em obra), resistência mecânica, dureza superficial, a porosidade e a permeabilidade. Para além da instabilidade natural que a rocha sofre por se encontrar em ambiente diferente daquele em que se gerou, que se traduz no seu envelhecimento, há a considerar acções físicas e químicas provocadas por agentes externos.

A falta de manutenção associada à avançada idade dos edifícios agrava a generalidade das situações anómalas, contribuindo de forma decisiva para o estado de degradação dos materiais e muitas vezes para o próprio colapso da construção.

As várias formas de manifestação da falta de manutenção são:

- Escorrência de águas;
- Materiais destacados dos paramentos;
- Fendilhação dispersa nos paramentos;
- Degradação dos caixilhos dos vãos exteriores;
- Corrosão de elementos metálicos.

As deteriorações que provocam o aparecimento da maior parte das fissuras e fendas em edificações podem ter origem quer num deficiente projecto ou execução da construção quer em assentamentos diferenciais da fundação. As deteriorações

associadas ao material pétreo estão normalmente ligadas mais à estética do edifício e, por essa razão, são de primordial importância na preservação do património edificado. Como síntese, pode-se dizer que os mecanismos e o grau de deterioração dos materiais pétreos dependem não só das propriedades intrínsecas inerentes à própria pedra como de causas extrínsecas que dependem do ambiente em que a pedra se encontra (humidade, temperatura, composição química da atmosfera, factores biológicos, tipo de construção, posição da pedra na construção, entre outros).

Das diversas propriedades das rochas, as mais importantes são, sem dúvida, a composição mineralógica e a porometria. O tipo, as dimensões e a quantidade dos poros condicionam em grande parte a durabilidade da pedra, uma vez que estão directamente ligados com a facilidade de penetração da água, principal agente de degradação. A ascensão da água por capilaridade é maior nas pedras com poros finos, enquanto que a velocidade de absorção é mais elevada em pedras com poros de maiores dimensões.

Seguindo a metodologia e a classificação referidas por FITZNER *et al.* (1992) e BEGONHA (1997, 2001a), os principais tipos de patologias identificados no Farol de S. Miguel-o-Anjo são os seguintes: Desagregação granular; Plaquetas; Crostas negras; Filmes negros; Patinas; Colonização biológica; Falta/Junta Aberta; Alteração cromática (mancha)

3.2 Farol de S. Miguel-o-Anjo

3.2.1 Introdução

Cedo o Porto demonstrou o seu grande potencial na construção naval, quer a nível industrial, quer comercial. A esse potencial não são alheias as ligações inquebráveis que o Porto possui com o Douro e com o Atlântico. A partir do século XIV foi o Porto o principal centro português de construções navais. Envolto nos enredos do mar, lançado na imensidão dos oceanos em busca de novas paragens, navios, marinheiros e população integraram interesses e esforços de muitas formas e, logo aquando da expedição à conquista de Ceuta, o infante D. Henrique, nascido na Invicta, aqui organiza uma formosa esquadra que levou a juntar-se ao rei que esperava em Lisboa antes de partirem para o Norte de África. Ao longo da história o Porto foi sempre muito cobiçado pelas riquezas, privilégios, autonomia e tradição que o caracterizavam, mas com o Foral Manuelino de 20 de Junho de 1517 o Porto perdeu grande parte dos seus privilégios.

Nos séculos XV e XVI, como, consequência da crescente expansão marítima portuguesa no mundo, a actividade económica do Porto era essencialmente o comércio ligado ao rio e ao mar. Todavia, esta actividade pressupunha algumas condições que se tornaram essenciais para o comércio e seu consequente desenvolvimento. A primeira

que urgia vencer era a dificuldade que os navios encontravam na entrada da barra, dado que a mesma era bastante estreita e perigosa.

Uma das figuras que contribuiu para que tais dificuldades fossem minimizadas foi D. Miguel da Silva, abade comendatário do mosteiro beneditino de Santo Tirso, mais tarde bispo de Viseu. A povoação de S. João da Foz do Douro era couto do mosteiro de Santo Tirso, tendo sido ali que a acção daquele prelado mais se fez sentir. Uma das mais interessantes figuras do renascimento português foi D. Miguel da Silva, que teve também a comenda do priorado do mosteiro de Landim, dos cônegos Regrantes de Santo Agostinho; a abadia do mosteiro beneditino de Santo Tirso e o mosteiro de S. Pedro de Águias da ordem de Cister.

Inspirado no complexo portuário da Roma Imperial, mandou fazer importantes obras na Foz do Douro, ao tempo, couto do mosteiro de Santo Tirso. Recorde-se que na capital italiana se fazia uma interessante ligação entre a doca marítima e as instalações fluviais do estuário do Tibre. D. Miguel da Silva queria construir na Foz do Douro um porto que rivalizasse com o de Lisboa e permitisse ao norte de Portugal um mais rápido e fácil acesso aos portos da Europa. Entre as várias obras que mandou edificar na Foz do Douro, deve destacar-se pela sua importância a Torre-Farol de S. Miguel-o-Anjo na Cantareira. Com o desenho do arquitecto italiano Francesco de Cremona, o monumento foi concluído em 1527 (figura 3.1).

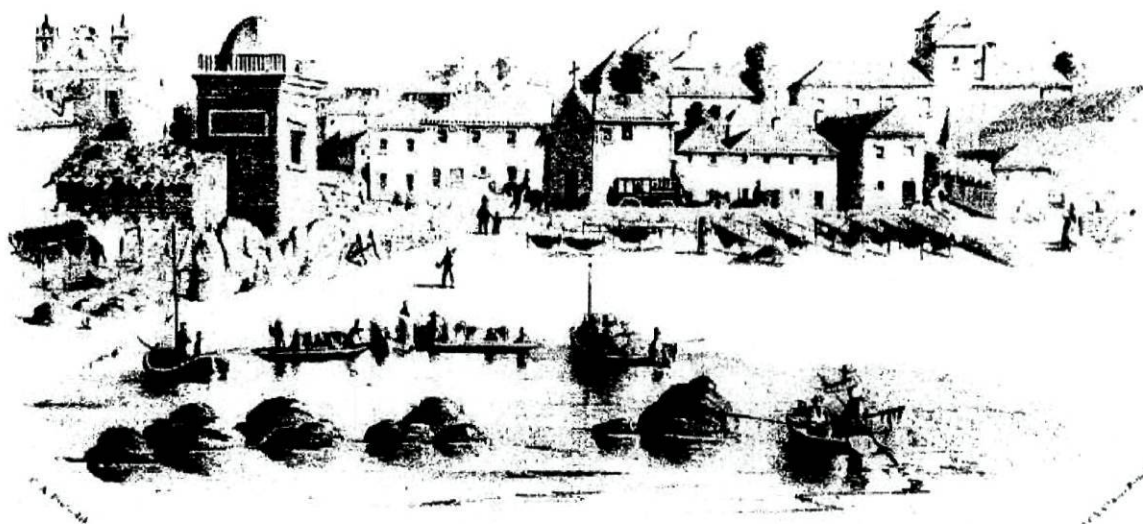


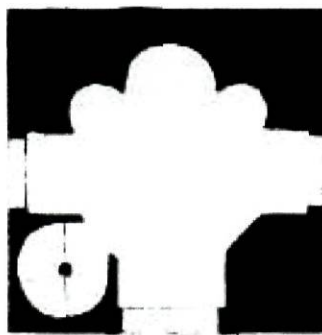
Fig. 3.1 – «Margens do Douro - A Cantareira» (1848) é uma litografia de Cesário Augusto Pinto. Encontra-se no seu álbum «As Margens do Douro», constituindo uma das últimas representações do farol de S. Miguel-o-Anjo antes da construção do edifício dos Pilotos da Barra e da Torre dos Semáforos, em 1852. Retirado de JESUS (2003)

Exteriormente tem a forma quadrangular, mas o interior é octogonal (figura 3.2), orientado para os pontos cardeais, com três nichos do formato de conchas incrustados na parede a Sul, nas paredes e, segundo consta, teve em tempos um altar barroco do século XVIII. Junto das janelas arquitravadas, uma a nascente e outra a poente (actualmente emparedada), existiam pequenos bancos de pedra e uma escada em caracol (cujo vão se encontra entaipado) que permitia aceder à cobertura, onde funcionariam os fogos que de noite permitiriam a orientação dos navegantes. No exterior numa pedra

situada sobre uma janela voltada para o rio, foi gravada uma frase latina, dirigida aos barcos que demandavam a barra, que traduzida diz o seguinte: “*Desejo que voltem sãos e salvos*”. Noutra pedra está gravada a inscrição latina, que também traduzida diz: “*D. Miguel da Silva, Bispo eleito de Viseu, fez esta torre para governo da entrada dos navios e deu e consignou campos comprados com o seu dinheiro para que do respectivo rendimento se acendessem na torre fogos perpetuamente*” (figura 3.3). As principais funções deste monumento eram as de “auxiliar a navegação” e, para o efeito, o próprio bispo, instituiu os meios necessários à manutenção do farol. Os rendimentos provinham dos impostos cobrados aos barcos, que demandassem a barra do Douro.



a)



b)

Fig.3.2.a) – Capela-Farol de S. Miguel-o-Anjo, vista de terra (desenho e reconstituição de Gouveia Portuense). Este farol, edificado em 1528, será o mais antigo farol português e o segundo mais antigo da Europa, tendo sido classificado como Imóvel de Interesse Público, em 5 de Janeiro de 1951 - Dec. N° 38147. Estes esquemas encontram-se em JESUS (2003).

Fig.3.2.b) – Planta da Capela-Farol de S. Miguel-o-Anjo (desenho e reconstituição de Gouveia Portuense), com o pátio (a tracejado) sobre o qual se viria a construir a obra oitocentista “Torre do Semáforo”. Retirado de JESUS (2003)



Fig. 3.3 – Capela-Farol de S. Miguel-o-Anjo nas suas faces voltadas para o rio e para o lado nascente, invocando a protecção de Deus e incentivando aos navegadores a sua passagem, sem perigo, pela barra, menciona que num dos testemunhos deixados nas paredes deste edifício se refere que o farol acendia todas as noites e era sustentado pelos réditos do próprio Bispo, D. Miguel da Silva. Retirado de JESUS (2003)

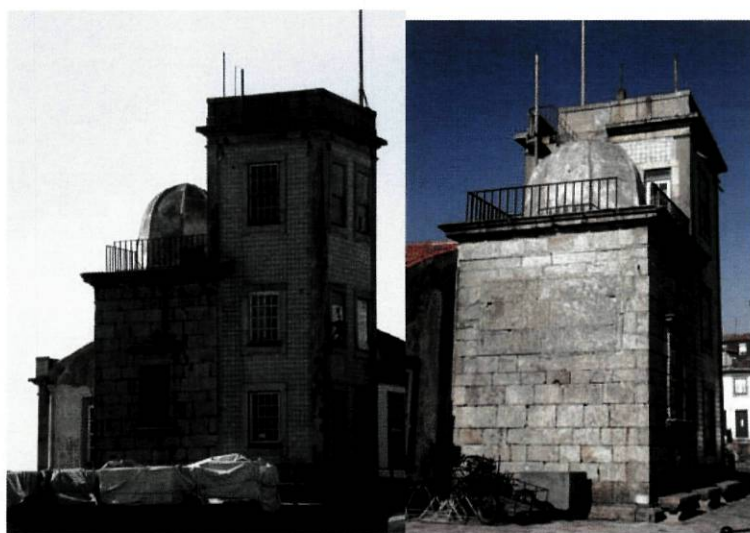
Além de iluminar a entrada do porto, ficava em mira com a Torre da Marca (erigida na zona onde mais tarde se rasgou a Avenida das Tílias no Jardim do Palácio de Cristal), para que pudesse guiar no bom caminho os barcos e naus que ao rio Douro aportassem. Primitivamente, o Farol de S. Miguel-o-Anjo estava implantado numa penedia, em pleno rio. Hoje, mercê do alargamento dos terrenos da margem encontra-se em terra firme. As luzes do farol eram constituídas por labaredas de archotes ou de fogueiras de lenha resinosa e carvão de lenha ardendo livremente e constituíam o clarão

avermelhado e fumoso que assinalava aos mareantes o abrigo desejado ou o perigo a evitar.

O que resta deste monumento situa-se no cais do Marégrafo, à Cantareira, margem direita do Douro, em direcção ao mar. Depois de ter servido de farol aos navios que demandavam o rio, mais tarde serviu de arrecadação de utensílios marítimos. O Edifício do Marégrafo construído sobre a Ermida de S. Miguel o Anjo foi construído em 1841 – Construção do Instituto de Socorros a Náufragos e da Torre-Semáforo anexos à Capela-Farol encostados respectivamente a Poente e a Norte, para aí instalar um posto da Guarda-Fiscal (figura 3.4).

O Farol de S. Miguel-o-Anjo apresenta actualmente um estado de degradação acentuado, que se deve essencialmente à sua proximidade dos ambientes marinho e fluvial (foz do Douro), associada a perto de 500 anos de existência. A Torre-Semáforo oitocentista sofre também de alguma degradação.

Esta Ermida-farol foi substituída nas suas funções pelo actual farol denominado “Farol da Luz” à foz do Douro.



a)

b)

Fig. 3.4 – a) Fachada lateral Nascente e b) Fachada lateral Sul do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro

Georeferenciação do Farol de S. Miguel-o-Anjo

Para a georeferenciação do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro (Porto), foi utilizado o aparelho de GPSmap 60CSX RoHs (Garmin). Este novo receptor SiRF de alta sensibilidade é constituído por: uma antena GPS; sensores: bússola electrónica e altímetro barométrico. Inclui também um mapa base Europeu e tem formatos de posição: Latitude/Longitude.

Os dados fornecidos pelo GPSmap 60CSX RoHs com um erro de mais/menos 2 metros para a georeferenciação do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro (Porto), são os seguintes:

Canto Sudoeste: N41° 08' 49,2''; W 008° 40'00,4''

Canto Sudeste: N41° 08' 49,3''; W 008° 40'00,1''

Canto Nordeste: N41° 08' 49,6''; W 008° 40'00,4''

Formação da Posição: hddd mm' ss, s''

DATUM do Mapa: WGS 84

3.2.1.1 Intervenções no Farol de S. Miguel-o-Anjo

O Farol de S. Miguel-o-Anjo ao longo da sua existência foi sendo intervencionado, sendo os seguintes projectos de intervenção os mais recentes. Estes projectos de intervenção forneceram para a Tese de Dissertação por um lado o projecto de arquitectura, e por outro lado dados das sondagens realizadas.

Projecto de Conservação (World Monuments Fund Portugal 2002)

Após a fase preparatória, na qual foram estabelecidos os protocolos com as diversas entidades activas nesta intervenção, desenvolve-se actualmente a fase de levantamento/projecto.

Foi terminado, no mês de Dezembro de 2002, um projecto de arquitectura e especialidades que teve como objectivo a adaptação dos edifícios contíguos ao Farol de forma a poderem funcionar como espaço museológico, sendo ainda mantida, numa área específica, a função de posto de socorro do Instituto de Socorros a Náufragos.

Em simultâneo, foi elaborado um rigoroso levantamento do estado de conservação do conjunto e, nomeadamente, das superfícies em granito do Farol. Esta fase será concluída com a elaboração de um projecto de conservação para o Farol, com base na avaliação em curso do levantamento do estado de conservação. Posteriormente, serão preparados e iniciados os trabalhos de conservação.

Designação do Sítio: Farol de São Miguel-o-Anjo - CNS: 25974

Tipo de Trabalho: Sondagem – **Ano do Trabalho:** 2006 (**Data de Início:** 18/01/2006 - **Data de Fim:** 13/05/2006)

Projecto: Intervenção de Arqueologia Preventiva no Farol de São Miguel-o-Anjo – Porto.

Estado: Relatório Aprovado.

Objectivos: A presente intervenção decorreu no quadro de um programa de revalorização do monumento. A intervenção incluiu trabalhos de sondagem, caracterização da história do edificado e acompanhamento arqueológico de desmonte de estruturas recentes. Fundava-se num programa metodológico desenhado com os objectivos primordiais de caracterizar e relacionar a sequência estratigráfica do local com as estruturas edificadas conhecidas, a fim de produzir um conjunto estruturado de informações relevantes para as opções a tomar em sede de projecto definitivo de remodelações/valorização deste monumento.

Resultados: Foi possível reconstruir a história evolutiva deste conjunto de edifícios, bem como recuperar a memória de outras estruturas, entretanto por completo desmanteladas ou encobertas por intervenções arquitectónicas subsequentes. A identificação de um muro destinado a proteger o farol das investidas do rio e das marés testemunha uma relação próxima, mas difícil, que as gentes da foz historicamente mantiveram com o Douro. Finalmente, a intervenção permitiu ainda redescobrir um conjunto de epígrafes apostas no edifício do farol e entretanto completamente mascaradas pelas construções posteriores, bem assim como, no cumprimento de um dos seus objectivos específicos, recuperar informações determinantes para a caracterização e avaliação do estado actual de conservação dos diferentes elementos arquitectónicos e decorativos do edifício do Farol de São Miguel-o-Anjo.

Arqueólogos: Miguel Jorge Gomes Tavares de Almeida/Co-responsável; Maria João Neves/Co-responsável; Susana Andreia Baptista de Almeida Nunes/Co-responsável; Filipe Gonçalves/Co-responsável.

3.2.2 Amostragem

Recolheram-se vinte amostras que receberam a designação de FSMA (Farol de S. Miguel-o-Anjo). A recolha das amostras foi faseada:

- As amostras de FSMA 1 a FSMA 7 foram colhidas na fachada Sul em Abril de 2008;
- As amostras FSMA 8 a FSMA 15 foram colhidas na fachada Nascente em Maio de 2008;
- As amostras FSMA 16,17 e 20 foram colhidas na parede Norte em Maio de 2008;
- As amostras FSMA 18 e 19 foram colhidas na parede Poente em Maio de 2008.

No quadro 3.1 apresentam-se a localização, classificação, descrição, cota e data de recolha das amostras.

Nas fachadas Sul e Nascente do Farol de S. Miguel-o-Anjo recolheram-se quinze amostras de diversas deteriorações (figuras 3.5 e 3.6).

Quadro 3.1 – Classificação das amostras recolhidas no Farol de S. Miguel-o-Anjo

Amostra	Classificação/descrição	Local	Cota acima do pavimento* (m)	Data da amostragem
FSMA 1	Amostra de plaqueta com filme negro, recolhida com lâmina metálica no granito	Fachada Sul	0,40-0,50	2008.04.26
FSMA 2	Amostra de colonização biológica líquen/alga no granito em desagregação granular, recolhida com lâmina metálica		1,30 – 1,40	2008.04.26
FSMA 3	Amostra de desagregação granular com alteração cromática do granito, recolhida com lâmina metálica		1,90 – 2,00	2008.04.26
FSMA 4	Amostra de alteração cromática do granito (ferrugem), recolhida com lâmina metálica		1,60 – 1,70	2008.04.26
FSMA 5	Amostra de líquen verde no granito do beiral, recolhida com lâmina metálica		Beiral	2008.05.28
FSMA 6	Amostra de líquen amarelo no granito do beiral, recolhida com lâmina metálica		Beiral	2008.05.28
FSMA 7A	Amostra de Película verde no granito, recolhida com lâmina metálica		0,50 – 0,60	2008.05.10
FSMA 7B	Amostra de Película verde no granito, recolhida com lâmina metálica		1,30 – 1,40	2008.05.10
FSMA 8	Amostra de desagregação granular do granito, recolhida com lâmina metálica	Fachada Nascente	1,60 – 1,70	2008.05.10
FSMA 9	Amostra de granito com fractura preenchida por feldspato, recolhida com lâmina metálica		1,60 – 1,70	2008.05.10
FSMA 10	Amostra de granito do beiral da Janela com Crosta Negra+Filme negro+Desagregação granular, recolhida com lâmina metálica		1,90 – 2,00	2008.05.10
FSMA 11	Amostra de alteração cromática do granito, recolhida com lâmina metálica		2,40 – 2,50	2008.05.10
FSMA 12	Amostra de filme negro, recolhida com lâmina metálica, no granito		Beiral	2008.05.28
FSMA 13	Amostra de argamassa da junta, recolhida com lâmina metálica		0,90 – 1,00	2008.05.28
FSMA 14	Amostra de plaqueta+filme negro+desagregação granular, recolhida com lâmina metálica, recolhida no granito		1,60-1,70	2008.06.30
FSMA 15	Amostra de desagregação granular do granito, recolhida com lâmina metálica		2,40 – 2,50	2008.05.10
FSMA 16	Amostra de granito com desagregação granular, recolhida perto da porta com lâmina metálica	Parede	1,60 – 1,70	2008.05.28
FSMA 17	Amostra de argamassa da junta do interior, recolhida com lâmina metálica	Norte	2,40 – 2,50	2008.05.28
FSMA 18	Amostra de desagregação granular do granito, recolhida com lâmina metálica	Parede	1,60 – 1,70	2008.05.28
FSMA 19	Amostra de desagregação granular do granito, recolhida com lâmina metálica	Poente	0,90 – 1,00	2008.05.28
FSMA20	Amostra de geomaterial da camada inferior aos blocos de granito s, recolhida com lâmina metálica	Parede Norte	0,30 – 0,40	2008.05.28

De um modo geral, o granito do Farol de S. Miguel-o-Anjo apresenta um perfil de meteorização bastante variável, verificando-se que as partes do granito não decompostas e/ou desagregadas aparecem predominantemente em núcleos de rocha pouco alterada e bastante rija.

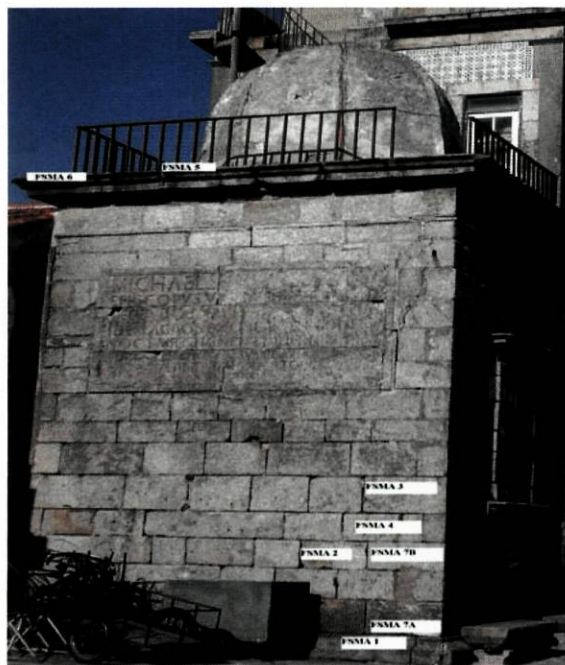


Fig. 3.5 – Amostragem na Fachada Sul do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro

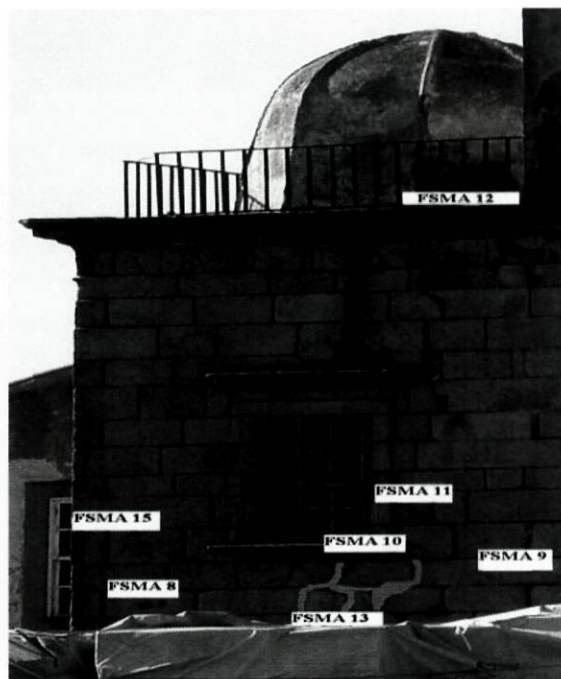


Fig. 3.6 – Amostragem na Fachada Nascente do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro

3.2.3 Descrição macroscópica das patologias

As características principais dos materiais que devem ser determinadas com a finalidade de se conhecer e descrever correctamente o seu comportamento, dizem respeito às suas propriedades mecânicas, ao seu estado de alteração estrutural, ao estados das suas ligações e uniões, e à sua resposta às acções exteriores.

A variabilidade das características do material e a dificuldade correspondente a uma correcta interpretação dos resultados podem levar a que se programem tipos de investigação diferentes que respeitem à medição das mesmas características.

A extracção de amostras é sempre traumática para os edifícios monumentais, devendo ser cuidadosamente programada no que respeita, quer aos pontos em que é possível fazer-se a sua extracção, quer às dimensões das amostras a serem extraídas, as quais não podem ser grandes, mas também não excessivamente reduzidas, porque o ensaio pode não resultar suficientemente representativo em consequência da heterogeneidade das alvenarias.

A utilização de uma tipologia de patologias permite caracterizar os aspectos da deterioração em função do tipo de pedra, dos aspectos arquitectónicos, das condições de exposição, etc. É assim possível definir padrões para a deterioração afectando os monumentos, identificar zonas mais danificadas ou mais susceptíveis aos processos da deterioração e formular hipóteses quanto aos agentes e processos responsáveis pela deterioração.

A tipologia das patologias permite também o mapeamento das variações morfológicas da deterioração em desenhos dos elementos afectados. Os tipos de patologias podem ser representados por diversos símbolos, tramas ou cores. A utilização das cores permite uma mais eficiente leitura da cartografia das patologias. Na escolha das cores que representam as várias patologias é recomendável utilizar tonalidades semelhantes para patologias com afinidades genéticas ou morfológicas.

As deteriorações nas rochas são geradas como resultado da acção separada ou concomitante, mais suave ou mais drástica, dos agentes meteóricos referidos no quadro 3.2, associando-se mecanismos de alteração diversos, especialmente em função do substrato pétreo a ser afectado.

Quadro 3.2 – Principais factores de meteorização e agentes mais comuns

Físico-químicos	Mecânicos	Geológicos	Biológicos
1. Temperatura (radiação solar, humidade relativa do ar; pressão (latitude, altitude, grau de confinamento)	1. Fraturação, Formação de lascas, deslocamento de blocos e fragmentos finos (variações diárias ou sazonais de temperatura)	1. Petrológicos (composição mineral, textura, granulação, cristalinidade)	1. Acção mecânica de microorganismos e plantas superiores; desenvolvimento de microorganismos (metabolismo orgânico)
2. Gases (componentes atmosféricos)	2. Acção eólica (correntes de ventos)	2. Grau de reatividade do mineral frente aos demais agentes (taxa de dissolução, dureza)	2. Acção química dos restos de organismos (produtos de decomposição orgânica, p. ex. fezes de pombos)
3. Hidrosfera (água, pH soluções aquosas superficiais)	3. Acção hidráulica (impactos de pingos de chuva e concentração de drenagem superficial em locais restritos)	3. Petrográficos (porosidade, permeabilidade, textura)	3. Antropogénico (actividade humana)

3.2.3.1 Patologias (origem física / mecânica)

3.2.3.1.1 Desagregação granular

A desagregação granular, também designada por desagregação arenosa, desintegração granular ou ainda impropriamente por arenização, tem sido considerada como resultado da acção de cristalização de sais solúveis próximo da superfície ou no interior das pedras, caracterizando-se pelo aumento da rugosidade das superfícies devido à presença de grãos minerais salientes, resultantes do desengaste dos grãos

por acção das forças de cristalização de sais solúveis e consequente perda de material (HENRIQUES *et al.*, 2005).

A desagregação granular pode afectar apenas os grãos mais superficiais ou, em casos extremos, a globalidade da pedra.

A desagregação granular conduz ao arredondamento das arestas, ao adoçamento das formas e à perda de pormenores de cantarias e esculturas. Em situações de deterioração mais severas, verifica-se a queda abundante de material de granulometria arenosa pelo simples toque das superfícies afectadas.

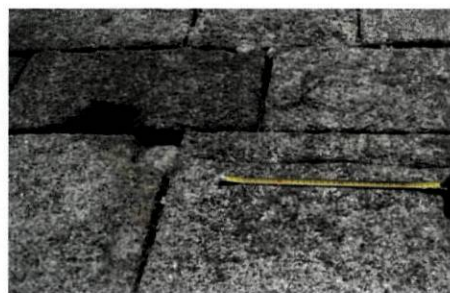
A desagregação granular aparece associada no Farol de S. Miguel-o-Anjo a áreas com as seguintes características: zonas húmidas não lixiviadas, localizadas nas áreas mais baixas do rés-do-chão das fachadas, submetidas à ascensão capilar de soluções salinas; zonas húmidas não lixiviadas, situadas abaixo de cornijas que separam os diversos pisos dos edifícios; zonas expostas, sobretudo orientadas para os ventos chuvosos; zonas adjacentes a juntas com argamassas inexistentes.

O efeito da ascensão capilar de soluções salinas a partir do solo é bem visível na figura 3.7, onde a desagregação granular de intensidade média ou forte é dominante até alturas que podem atingir cerca de 2,5 m acima do solo (Cota acima do pavimento até onde foram recolhidas amostras). O posicionamento da desagregação granular acima de áreas afectadas por placas e/ou plaquetas verifica-se em muitos monumentos.

Pedras delimitadas por juntas, em que foram utilizadas argamassas de cimento Portland, apresentam desagregação granular nas zonas adjacentes às argamassas, originando o arredondamento das arestas e vértices. Quando se sobrepõem os efeitos provocados pela ascensão capilar de soluções salinas a partir do solo e os provocados pela utilização recente de argamassas de cimento Portland, as pedras exibem desagregação granular diferencial, forte nos bordos com perdas importantes de material pétreo, e, menos intensa no centro da superfície exposta, resultando o centro saliente relativamente aos bordos (figura 3.7d). Quando a perda de material é muito forte nos bordos das pedras, as argamassas ficam em relevo, aumentando o contraste entre as pedras e as argamassas, podendo mesmo cair devido à falta de base de sustentação por parte das pedras erodidas.



a)



b)

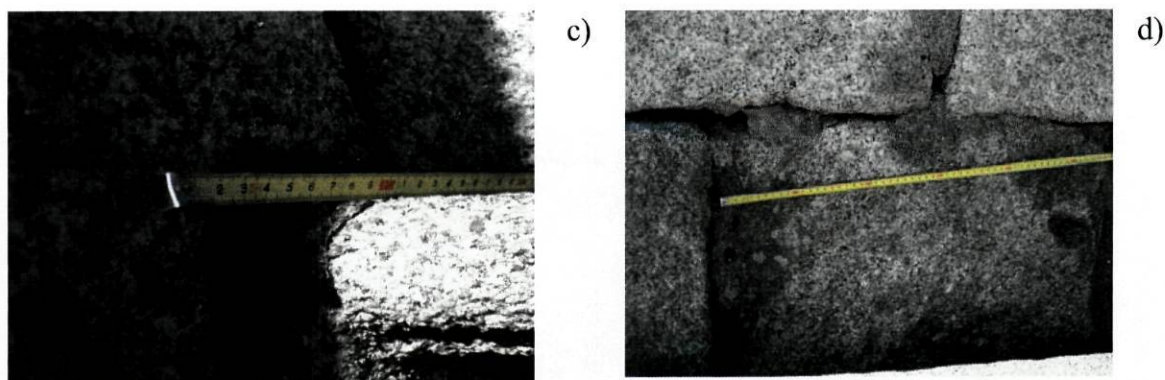


Fig. 3.7 – a), b), c), e d) – Desagregação granular no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro

A desagregação granular está sistematicamente ligada à presença, normalmente em quantidades reduzidas, de sais muito solúveis como a halite NaCl , a soda niter (NaNO_3), e a thenardite (Na_2SO_4) segundo BEGONHA (2001a). Estes sais precipitam sob elevadas concentrações das soluções salinas. Consequentemente, no momento da cristalização destes sais não resta senão pouca quantidade de solução na rede porosa da rocha. É nos poros mais finos, em particular nas interligações e nos estreitamentos, que precipitam os sais mais solúveis, desenvolvendo-se pressões de cristalização muito fortes que conduzem ao desengaste dos grãos. A diferença de solubilidade dos sais determina, neste caso, a posição de cristalização no seio da rede porosa; os sais mais solúveis como a halite, a soda niter e a thenardite, ainda que menos abundantes que o gesso, cristalizam na pedra nos poros mais finos, onde provocam fortes deteriorações, enquanto que o gesso, muito menos solúvel, precipita em fases anteriores de evaporação em poros de maiores dimensões, não introduzindo tensões significativas nas paredes da rede porosa. Por este motivo a quantidade de gesso presente nas amostras não é em geral proporcional à intensidade da desagregação granular.

Os ventos dominantes na Foz do Douro na cidade do Porto são de SE e de NW, o primeiro destes rumos, frequentemente entre Outubro e Março (durante a época das chuvas e do frio), e o segundo de Abril a Setembro (durante a época do calor).

3.2.3.1.2 Falta / Junta Aberta

Esta anomalia caracteriza-se pela ausência de material resultante da queda ou perda de partes dos elementos constituintes da alvenaria, devido ao agravamento de outras anomalias. Tem como consequência a exposição dos elementos constituintes da estrutura interna da pedra (HENRIQUES *et al.*, 2005).

Junta aberta – descontinuidade entre dois elementos com perda do material de refechamento utilizado. As principais causas, associadas a uma fragilidade preexistente do material (figura 3.8): Choques; Buracos de granadas (projecteis) de canhões; Acidentes; Vandalismo.

A partir do século XV, os primitivos projecteis feitos de pedra foram substituídos por outros de ferro ou de chumbo, e os canhões passaram a ser classificados de acordo

com o peso de seus projecteis. No fim do século XVIII usavam-se canhões que lançavam projecteis de 2, 4 e 6 kg e obuses de 15 cm de diâmetro. Os canhões dos navios eram providos de balas que variavam de meio a 16 kg e as caronadas (canhões curtos de grosso calibre), de 6 a 34 kg (figuras 3.8b e 3.8d). Durante as guerras Liberais, também há registos que o forte de São João Batista da Foz (Castelo S. João da Foz), esteve envolvido nas Revoltas liberais, tendo protegido, durante o cerco do Porto (1832-1833) o desembarque de suprimentos para a cidade, e portanto devido à proximidade do Farol de S. Miguel-o-Anjo, este apresenta buracos de granadas de canhões.

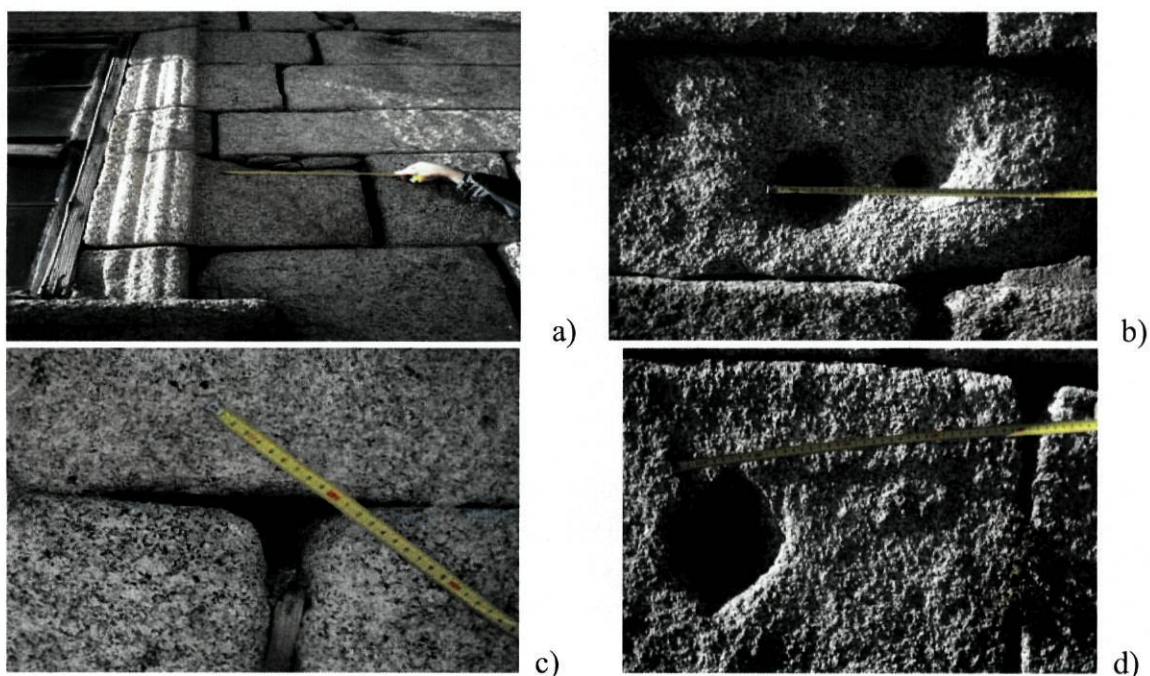


Fig. 3.8 – a) e c) – Junta Aberta com argamassas inexistentes e Faltas. b) e d) – Buracos de granadas (projecteis) de canhões, na fachada Nascente.

3.2.3.2 Patologias (origem química)

3.2.3.2.1 Crostas Negras

As crostas negras caracterizam-se, como o seu nome indica, pela sua cor negra. São formadas por depósitos que cobrem as superfícies das pedras e argamassas das juntas e, em muitos casos, as superfícies exteriores de placas e plaquetas. Pedras afectadas por desagregação granular não apresentam crostas negras, devido à queda mais ou menos contínua de material pétreo, impedindo assim o seu desenvolvimento. A superfície das crostas negras é mais ou menos irregular e raramente acompanha a rugosidade superficial das pedras que recobre (figura 3.9).

A espessura das crostas negras pode variar entre 0,05 mm e 10 mm (HENRIQUES *et al.*, 2005). As crostas negras mais espessas apresentam muitas vezes superfície com relevo com forma dendrítica característica, idêntica à forma de couve-flor ou formas botríoides (tipo framboesa). Apresentam uma zona superficial pouco resistente, mas as zonas intermédia e interior são bastantes compactas e

resistentes, permanecendo unidas após a sua extracção para amostragem. As crostas negras menos espessas constituem formações mecanicamente pouco resistentes, esfarelando-se facilmente.

Apesar de aparentemente não parecerem afectar a pedra subjacente, as crostas negras acabam por empolar, "explodir" e cair, arrastando a película mais superficial da pedra e originando formas semelhantes a crateras lunares, as quais são delimitadas por uma zona anelar de crosta negra empolada e separada da pedra. A superfície pétrea exposta revela aspectos pulverulento ou de desagregação granular de cor mais clara, que contrasta com o negro das zonas cobertas com as crostas negras.

As crostas negras são essencialmente constituídas por cristais de gesso e cinzas volantes muito porosas, de natureza carbonosa e ricas em enxofre, resultantes da queima de combustíveis fósseis.

O facto de os primeiros estudos sobre a génese das crostas negras terem incidido sobre monumentos de rochas carbonatadas levou a pensar-se que o gesso das crostas resultaria da reacção entre a calcite da pedra e o ião sulfato (SO_4^{2-}), presente nas águas das chuvas ácidas.

A formação de crostas negras em monumentos construídos com rochas não carbonatadas como os granitos e o grés siliciosos colocou o problema suplementar das fontes de cálcio, elemento necessário para a formação do gesso. Dada a formação de crostas negras ao lado das argamassas em monumentos construídos com granitos ou grés siliciosos, consideraram-se as argamassas como a principal fonte do ião cálcio (Ca^{2+}) que por reacção com o ião SO_4^{2-} , formaria o gesso. Todavia, o número de crostas negras associadas à proximidade das argamassas das juntas é diminuto, quando comparado com o número total de crostas negras, pelo que a principal fonte de cálcio das crostas negras não pode ser atribuída à composição das argamassas (BEGONHA, 2001a).

Verifica-se, na realidade, que a composição das águas da chuva em regiões urbanas e/ou industriais apresenta razão $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ próxima ou igual à razão $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ do gesso. Efectivamente, comprovou-se que o gesso é o único sulfato que cristaliza em quantidades significativas a partir da evaporação deste tipo de águas da chuva. As crostas negras são uma deterioração característica de zonas urbanas e/ou industriais, facto confirmado pela presença generalizada de crostas negras em edifícios e monumentos destas zonas e a sua ausência ou presença muito pouco significativa em regiões pouco ou não afectadas pela poluição do ar.

A formação de crostas negras está associada a zonas húmidas e protegidas das fachadas sujeitas a molhagem directa ou indirecta, mas não submetidas a lixiviação por parte das águas de escorrência, designadamente sob cornijas e consolas e em zonas recuadas e nichos (a fig.3.9 do lado direito está com uma ampliação 12x).

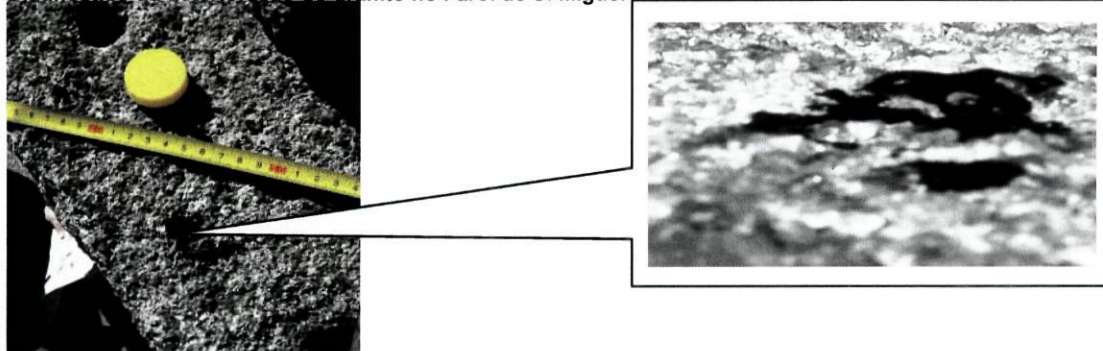


Fig. 3.9 – Crostas Negras no beiral da janela da Fachada Nascente do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro

As crostas negras existentes sob as cornijas, não se formam ao lado das juntas abertas por onde circula a água (zonas sujeitas a desagregação granular de intensidade média ou fraca), mas por vezes formam-se em simetria com as juntas e a alguns centímetros de distância das mesmas.

As crostas negras formam-se sobre qualquer tipo de material pétreo. A parte mais exterior do material foi modificada por deposição de substâncias exógenas ou de produtos de tratamento, com espessura variável e características distintas das do interior, podendo destacar-se espontaneamente do substrato, que se apresenta desagregado e pulverulento.

As crostas negras ocorrem em locais abrigados. Podem chegar a assumir formas botriíodes (aspecto superficial de framboesa)

Na natureza, estas crostas podem ser muito complexas e resultam, frequentemente, de lentas alterações químicas da camada exterior de um afloramento ou de um penhasco. O ferro que cimenta os grãos e/ou está presente em minerais acessórios da pedra, é tomado em dissolução quando a pedra é molhada, precipitando depois sobre ou perto da superfície, conforme a pedra seca. O efeito produzido é a formação de uma camada exterior resistente que, até certo ponto, protege a pedra contra a degradação ambiental. No entanto, como se vê em certas partes do farol, uma vez que esta crosta abra brechas, a pedra enfraquecida subjacente fica muito susceptível a processos como a degradação ambiental salina.

3.2.3.2.2 Filmes negros

Os filmes negros são, como o nome indica, formações superficiais muito finas de cor negra ou castanha muito escura. Recobrem e aderem fortemente à superfície das pedras, incluindo as superfícies exteriores de muitas placas e plaquetas, mantendo, devido à sua reduzida espessura, a rugosidade superficial da pedra, contrariamente ao que sucede com as crostas negras. No entanto, tal como as crostas negras, são constituídos por depósitos superficiais e não por fragmentos da pedra. São normalmente baços, homogéneos e duros, aderindo de tal forma à superfície das pedras, que a sua remoção em trabalhos de limpeza é difícil (HENRIQUES *et al.*, 2005).

Por vezes apresentam brilho metálico ou aspecto brilhante idêntico ao asfalto fresco. Este brilho pode ser atribuído a teores excepcionalmente elevados em ferro ou de compostos de carbono.

Parece não haver dúvidas quanto ao carácter hidrófugo dos filmes negros. Isto foi comprovado na Igreja dos Clérigos no Porto mediante o cálculo do tempo de absorção de microgotas (BEGONHA, 2001a). Obtiveram-se valores da ordem de 117%, isto é, valores superiores ao tempo de evaporação de uma gota colocada sobre uma superfície de vidro despolido. Apesar do carácter hidrófugo e de aparentemente parecerem proteger a superfície das pedras, os filmes negros não impedem o aparecimento posterior de desagregação granular nas pedras (BEGONHA, 2001a).

Os filmes negros são constituídos por uma enorme quantidade de partículas de reduzida dimensão (raramente ultrapassando os 10 a 20 μm) agregadas por uma matriz de material homogéneo provavelmente de natureza amorfa. Estas partículas caracterizam-se por uma grande complexidade mineralógica e morfológica, destacando-se os seguintes tipos: cristais xenomórficos de quartzo, feldspatos e micas, resultantes da deposição de poeiras do solo e das ruas; partículas de forma irregular ricas em ferro; partículas ricas em carbono; cinzas volantes, esféricas, de superfície lisa e composição química diversa; cinzas volantes, esféricas, porosas, de natureza carbonosa; cristais de gesso raros.

Quimicamente, os filmes negros distinguem-se das crostas negras por quantitativos mais elevados em ferro, enquanto que estas denotam forte enriquecimento em enxofre e cálcio.

Relativamente à grande concentração de ferro nos filmes negros, a principal fonte é poluição atmosférica (tráfego automóvel e poluição industrial), não sendo de excluir no entanto a hipótese de que uma pequena quantidade do ferro dos filmes negros possa resultar do ataque directo a mineral ricos em ferro existentes na superfície das pedras por parte das águas das chuvas ácidas.

O carbono aparece sob a forma de grafite mal cristalizada e de compostos orgânico sem poeiras e sujidades. O carbono é gerado por várias fontes poluentes entre as quais o tráfego automóvel, indústria, centrais térmicas de queima de carvão e/ou fuel e aquecimento doméstico (figura 3.10).

Os filmes negros aparecem associados às três seguintes zonas: Zonas expostas, mas não sujeitas nem à acção directa dos ventos associados aos episódios de precipitação nem à escorrência; Zonas expostas directamente à chuva, mas não submetidas a escorrência forte; Zonas mais baixas das fachadas, submetidas ao salpico da chuva a partir do solo.

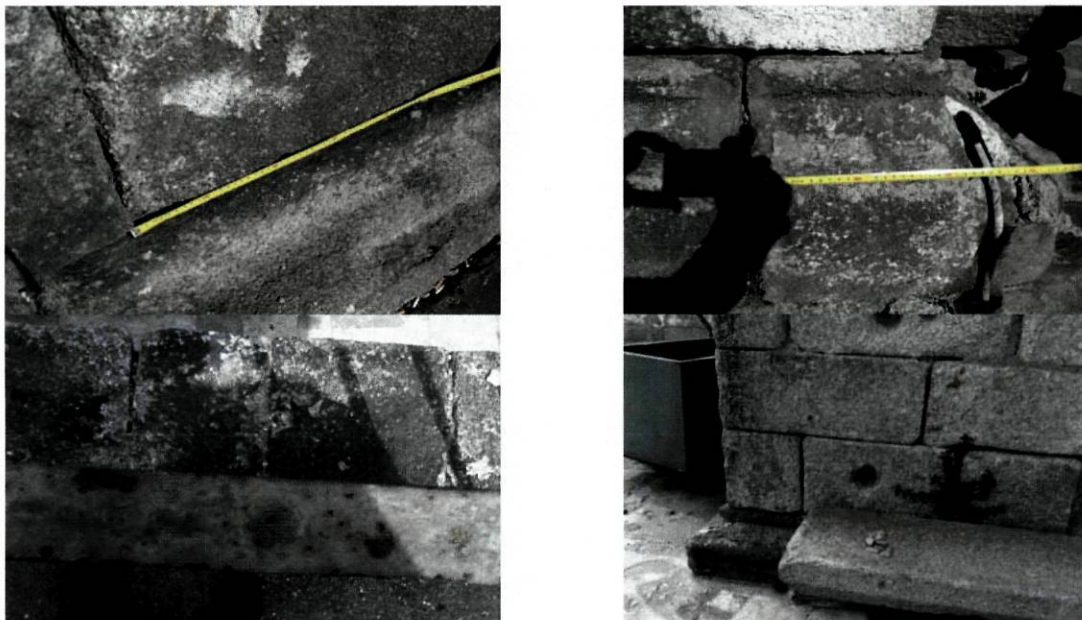


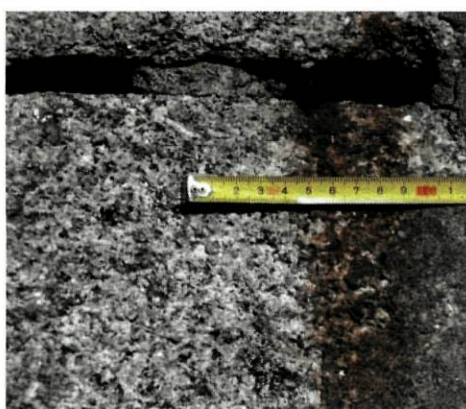
Fig. 3.10 – Filmes negros nas fachadas Sul e Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo

Pedras próximas ou em contacto com o solo e sujeitas ao salpico da água da chuva estão igualmente revestidas por filmes negros. Estas pedras, além de permanecerem mais tempo molhadas devido à acção conjunta da ascensão capilar de soluções e aos salpicos das águas da chuva a partir do solo, estão sujeitas à deposição de grande número de partículas provenientes do solo e transportadas pelos salpicos.

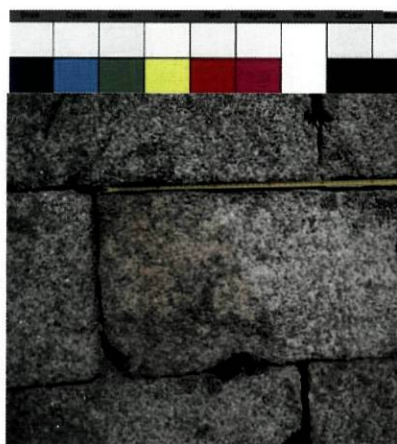
3.2.3.2.3 Alteração cromática

Mancha – alteração cromática numa zona circunscrita e contrastante com as zonas vizinhas (figura 3.11).

A alteração cromática pode ter origem em reacções químicas (carbonatação, dissolução, oxidação) que resultam na modificação da estrutura pétrea e variação do aspecto, com evaporação e perda do material. Os principais agentes causadores da erosão química: Contaminantes atmosféricos; Sais ou álcalis dissolvidos em águas de capilaridade, filtração ou acidentais; Produtos aplicados.



a)



b)

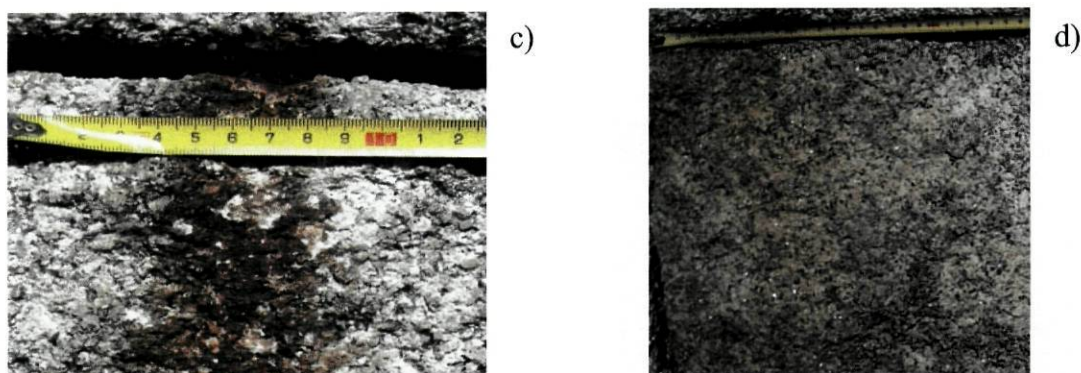


Fig. 3.11 – a), b), c) e d) – Aspecto geral da alteração cromática (mancha) presente nas fachadas sul e nascente do Farol de S. Miguel-o-Anjo, ferrosas e beges amareladas.

A alteração cromática é uma alteração que se manifesta através da variação de um ou mais parâmetros que definem a cor, com morfologia diversa e localização numa zona ampla ou localizada (AIRES-BARROS, 2001). Desde que a pedra é extraída da pedreira, é submetida a tensões. Quando é colocada em obra tende a se adaptar aos materiais vizinhos, aos quais se lhe acresce as condições do meio que os envolvem (factores extrínsecos). Todos estes factores – físicos, químicos e biológicos – promovem alterações nas rochas, isto é, admite-se que ocorrem perturbações no equilíbrio inicial da rocha, e por tal motivo sofrem alterações cromáticas (AIRES-BARROS, 2001). Segundo BEGONHA (2001) as cores predominantes do “Granito do Porto” são as cores cinzentas, correspondendo à rocha sã, e a cor bege amarelado, correspondendo à rocha mais alterada.

3.2.3.2.4 Plaquetas

Plaqueta – destaque de fragmentos achatados paralelos à superfície, com grande extensão lateral e espessura inferior a meio centímetro, figura 3.12.

As principais causas são: erosão da chuva (principalmente da chuva ácida, consequência da poluição atmosférica).

Lascagem – destaque de fragmentos de extensão lateral reduzida e espessura centimétrica, sub paralelos à superfície (figura 3.12).

“Os termos lascagem, placa e plaqueta representam perdas de material de dimensões apreciáveis, diferenciadas entre si de forma arbitrária, pelo que em situações complexas se admite que possam ser cartografadas em conjunto de dois ou três, assumindo nesses casos a designação resultante da junção desses termos (ex.: lasca / placa / plaqueta).” - Fonte: “Materiais pétreos e similares – terminologia das formas de alteração e degradação” (HENRIQUES *et al.*, 2005).

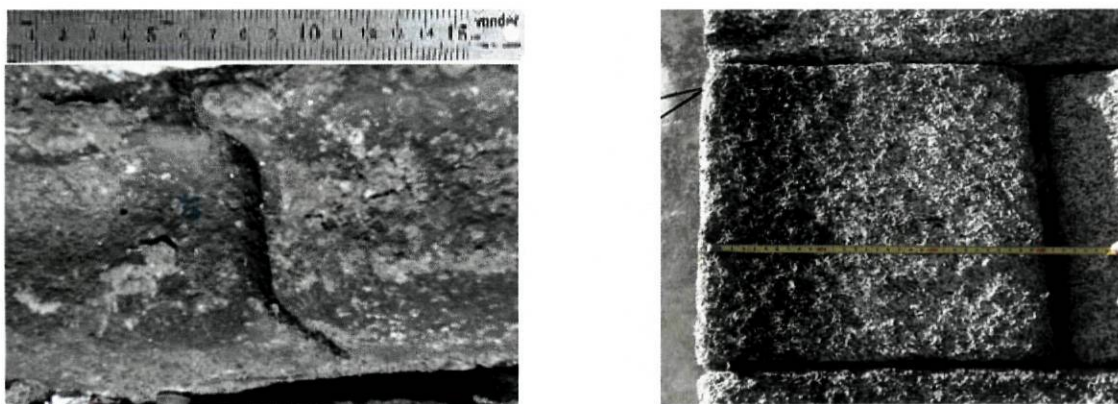


Fig. 3.12 – Plaquetas/lascas associadas aos filmes negros no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro

3.2.3.3 Patologias (origem biológica)

A biodeterioração dos materiais pétreos raramente se deve a um grupo distinto de microrganismos. Como refere WARSCHEID & BRAAMS (2000) numa determinada área, e num mesmo período de tempo, coexistem, em regra, muitos grupos de microrganismos. A sua simples presença não provoca, em regra, fenómenos de biodeterioração. Esta deve-se antes ao ciclo de vida e crescimento dos microrganismos que respondem, de forma activa, às alterações das condições ambientais.

Segundo WARSCHEID & BRAAMS (2000), o crescimento biológico é favorecido para valores de temperatura superiores a 20°C e teores de humidade relativa superiores a 65 %. A existência de fontes de iluminação (natural ou artificial) e a disponibilidade de nutrientes contribuem, igualmente, para esse crescimento.

Enquanto a bio-susceptibilidade primária da pedra depende sobretudo da sua estrutura e composição química, a intensidade da contaminação biológica é determinada, em grande parte, pelas condições ambientais em que aquela se encontra (WARSCHEID & BRAAMS, 2000).

Os primeiros colonizadores de materiais pétreos no exterior são organismos autotróficos, como as microalgas e as cianobactérias. Os principais factores que condicionam o seu aparecimento são: Luz; Humidade; Temperatura; pH. Estes microrganismos preferem, de acordo com CANEVA *et al.* (1994), substratos ligeiramente alcalinos, como as rochas calcárias, e têm a capacidade de crescer apenas com dióxido de carbono, azoto e vestígios de sais minerais.

Os principais danos que provocam na pedra são: Biofilmes de extensão, espessura, consistência e cor diversa, com uma forte adesão ao substrato (TIANO, 1998). Estes biofilmes, para além de reterem a água, permitem a adesão de poeiras, terras e resíduos orgânicos que favorecem o crescimento posterior de outros organismos; Libertação de ácidos, orgânicos e inorgânicos, que reagem com os minerais, formando sais solúveis.

Os líquenes incluem-se também nos primeiros colonizadores de substratos pétreos. Segundo Caneva et al. (1994) e Tiano (1998) os principais danos que provocam na pedra são: Colonizações de cores diversas (branca, amarela, laranja, verde); acção mecânica sobre o substrato, devida à penetração das hifas; produção de ácido carbónico que reage com alguns minerais removendo os catiões básicos (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) e os silicatos; excreção de ácido oxálico que corrói a superfície da pedra; libertação de ácidos orgânicos com propriedades quelantes que podem actuar como agentes complexantes dos catiões minerais formando compostos solúveis; produção de pigmentos que provocam alterações cromáticas. Numa fase posterior surgem, em regra, os microrganismos heterotróficos, como algumas bactérias e os fungos. Apesar da composição inorgânica da pedra não constituir um substrato favorável ao desenvolvimento de organismos heterotróficos, este é possível devido à presença de nutrientes (Caneva et al., 1991). Os nutrientes podem ser devidos a: actividade de outros organismos; materiais provenientes do próprio substrato; partículas que naturalmente se acumulam à superfície produzindo depósitos finos. Por serem muito pequenas, as bactérias não têm uma penetração activa nos materiais, atacando-os sobretudo por via química através de: processos de solubilização e acidificação, que produzem alterações várias como esfoliações e pulverização (Caneva et al., 1994); alterações cromáticas (Caneva et al., 1994; Tiano, 1998). De acordo com vários autores (Caneva et al., 1994; WARSCHEID & BRAAMS, 2000), e no estudo da deterioração da pedra da Igreja de Santa Maria de Leça do Mosteiro de Leça do Balio (MOUTINHO DA SILVA, 2005), os fungos parecem ser os microrganismos cuja acção química mais contribui para a biodeterioração da pedra.

Os danos que produzem na pedra são, sobretudo, de dois tipos: Formação de manchas, mais ou menos superficiais, devidas à libertação de pigmentos ou à presença do micélio (CANEVA *et al.*, 1994); Solubilização da pedra, associada a uma diminuição do pH, resultante da produção de ácidos orgânicos (cítrico, oxálico, glucónico, láctico) que formam complexos quelantes com os catiões metálicos da pedra.

Em resumo, apresentam-se na tabela 3.1 os principais microrganismos responsáveis por biodeterioração da pedra, alguns dos seus produtos de metabolismo e dos seus efeitos na pedra.

Tabela 3.1 – Principais microrganismos responsáveis por biodeterioração da pedra: alguns dos seus produtos de metabolismo e dos seus efeitos, Adaptado de WARSCHEID & BRAAMS, 2000.

Microrganismo	Produtos de metabolismo	Efeitos na pedra
Bactérias autotróficas	Ácidos inorgânicos	Dissolução
Bactérias heterotróficas	Ácidos orgânicos	Dissolução Formação de patines
Fungos	Ácidos orgânicos	Deterioração mecânica e química

Microrganismo	Produtos de metabolismo	Efeitos na pedra
Algas e cianobactérias	Ácidos orgânicos ou compostos quelantes	Retenção de água Favorecimento do crescimento de seres heterotróficos Dissolução de minerais Formação de patinas e películas de cores diversas
Líquenes	Ácidos orgânicos, sobretudo ácido oxálico	Deterioração física e química Aumento da porosidade

3.2.3.3.1 Colonização Biológica

Vegetação

Presença de manifestações biológicas do tipo dos musgos e plantas de ordem superior.

As principais causas são: Processos biofísicos – plantas e árvores alimentam-se de nutrientes contidos nas pedras; as suas raízes e rebentos pressionam os poros da pedra, dilatando-os e degradando-a (ataque mecânico).

A hera é uma planta particularmente perigosa, cresce muito rapidamente através de caminhos aéreos; penetra profundamente nas juntas entre as pedras, provocando a sua abertura (figura 3.13).

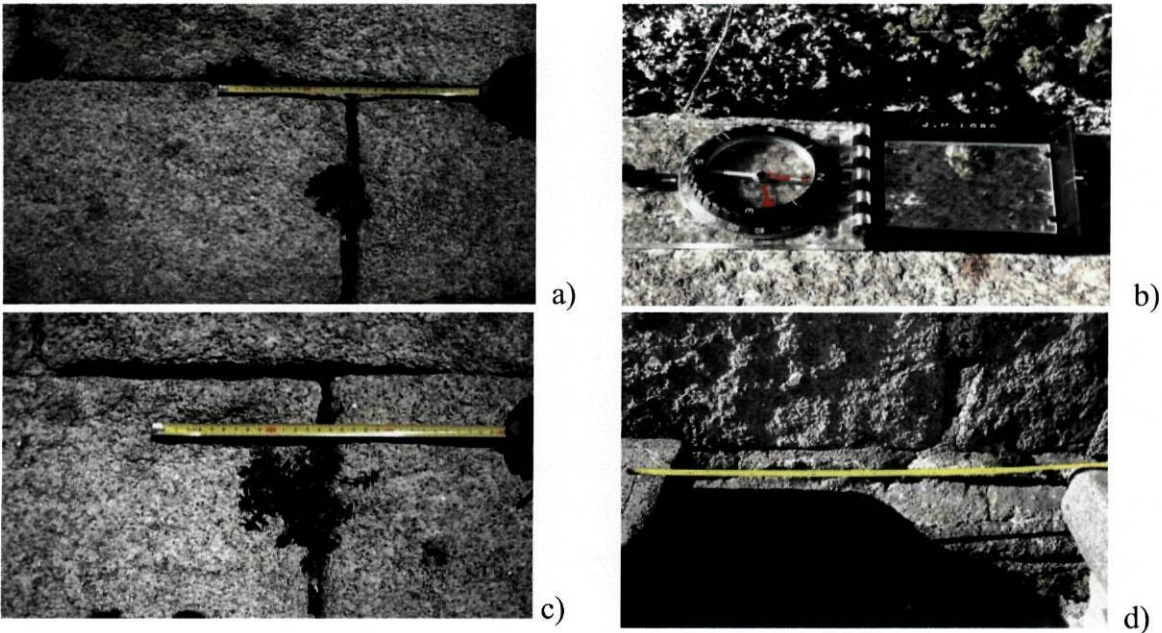


Fig. 3.13 – a), b), c) e d) – Presença de vegetação no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro

As plantas pioneiras na colonização de ambientes inóspitos, como são os paramentos, as argamassas, apresentam uma maior concentração de iões de hidrogénio que lhes permite extrair os iões de minerais do substrato. As briófitas e as plantas

inferiores não apresentam esta capacidade de extrair minerais dos substratos, pelo que não se desenvolvem na ausência de matéria orgânica. As briófitas, o segundo maior grupo de plantas terrestres, com 14 mil espécies, são um grupo muito antigo. A acção mecânica e/ou química destes organismos sobre as argamassas é negligenciável uma vez que não dispõem de raízes, mas sim rizóides que não contactam directamente com o substrato, e a sua capacidade de acumular iões de cálcio não pode ser considerada como uma biodeterioração.

As plantas mais desenvolvidas, apresentando verdadeiros sistemas de raízes e aparato aéreo, já podem ser agentes de degradação mais importantes, principalmente através da pressão exercida pelo crescimento das raízes e a exsudação de ácidos (oxálico, cítrico, etc.) que têm por função dissolver os silicatos e os carbonatos de modo a poderem ser captados e absorvidos.

Líquenes (Fachada Nascente/Fachada Sul)

A Colonização biológica tem estrato superficial geralmente fino, de natureza biológica e coloração diversa, do tipo das algas e líquenes. As algas e os líquenes são formadores de terreno fértil para o desenvolvimento de fungos e de vegetais. Constituem ataques químicos, principalmente em paramentos de materiais porosos, húmidos e pouco ventilados. Provocam alterações de coloração e de aspecto, aparecimento de bolores e libertação de substâncias químicas que levam à erosão química dos paramentos (processos bioquímicos) (figura 3.14).

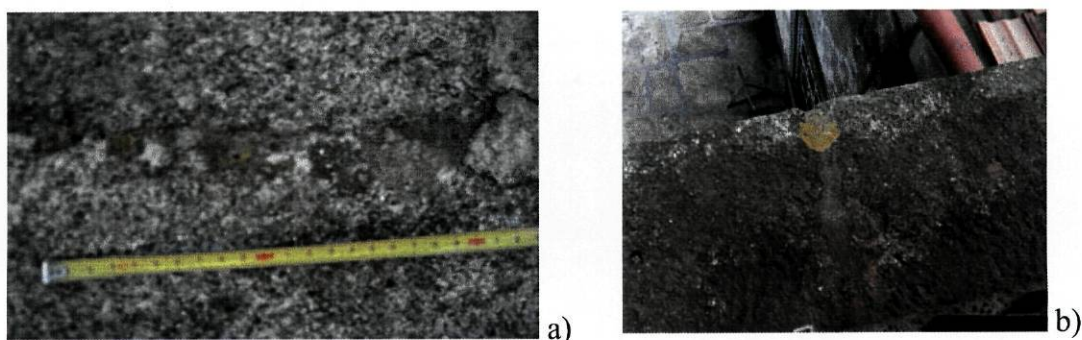


Fig. 3.14 – Presença de líquenes no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro. a) - Líquen esverdeado (com ampliação de 3x). b) - Líquen amarelo

Os líquenes constituem um caso especial do reino vegetal, pois são, não um só, mas dois organismos distintos. Constituem associações estáveis e auto-suficientes entre um fungo (micobionte) e um ou mais organismos fotossintéticos (fotobionte), que podem ser tanto uma alga unicelular como uma cianobactéria. Cada um dos organismos do líquen desempenha funções específicas. Assim, o fotobionte, graças à sua clorofila, é capaz de absorver a energia da luz solar e sintetizar compostos orgânicos, enquanto que o fungo absorve do substrato a água com as substâncias nela dissolvidas e, além disso, protege a fotobionte do meio ambiente. A simbiose resultante da associação entre os dois organismos forma um talo liquémico que é diferente da forma que assume cada um

dos biontes quando se desenvolve isoladamente. O micobionte é composto por filamentos entrelaçados, denominados hifas, que não apresentam diferenças fundamentais, a nível citológico, em relação aos encontrados nos fungos não liquenizados. Como é heterotrófico, obtém os compostos orgânicos carbonatados de que precisa a partir dos produtos (fotossintéticos) sintetizados pelo fotobionte. O fotobionte localiza-se no interior do talo, normalmente como células isoladas rodeadas pelas hifas, podendo ser uma alga, contendo clorofila, ou uma cianobactéria, com um pigmento fotossintético.

Os líquenes presentes no Farol de S. Miguel-o-Anjo foram classificados de acordo com a forma do talo liquémico (adaptado de MARQUES, 2008) em duas categorias:

- Crustáceo – apresentam uma estrutura bastante variada, desde crostas com forma pulverulenta até talos elaborados, com córtex superior e medula (tabela 3.2);
- Foliáceo – apresentam uma forma semelhante a uma folha, com as superfícies superior e inferior distintas e expostas ao ar (tabela 3.3).

Espécie	Cor do Talo			Tipo de Talo		Cor do Disco			
	Branco ou cinzento	Verde	Verde ou Amarelo	Castanho	Branco	Negro	Verde ou Amarelo	Castanho	Branco
<i>Aspicilia calcarea</i>	X					X			
<i>Dimerella lutea</i>		X			X				X
<i>Diploicia canescens</i>	X								
<i>Graphis scripta</i>	X								
<i>Lepraria incana</i>	X			X				X	
<i>Pertusaria amara</i>	X								
<i>Pertusaria perfusa</i>	X	X	X	X			X	X	

Tabela 3.2 – Líquenes crustáceos (adaptado de MARQUES, 2008)

Segundo MARQUES (2008), a acção dos líquenes pode ser decomposta numa componente física (resultante da acção mecânica dos dispositivos de fixação do talo e quando este sofre variações de volume em função das condições de humidade) e numa componente química (resultante da produção de compostos químicos que atacam os minerais das rochas) que é em geral mais relevante. Inicialmente, a degradação mecânica provocada por líquenes resulta da penetração dos dispositivos de fixação e do próprio talo em poros, fendas e fissuras existentes. O crescimento do líquen, nomeadamente o aumento de massa do talo, irá provocar o aumento dessas mesmas fendas e fissuras. A libertação periódica do talo devida a flutuações do seu teor de humidade poderá causar a queda de fragmentos que entretanto perderam aderência. A degradação química que resulta da actividade metabólica dos líquenes traduz-se na secreção de diversos ácidos que reagem com os compostos das próprias paredes

(rochas). Pela sua importância, pode-se destacar dois desses ácidos: o oxálico e o carbónico.

Espécie	Superfície superior				Superfície inferior		Talo		Presença de Rizinas	
	Amarelo ou Cor--de-laranja	Castanho	Cinzentos	Verde	Castanha ou preta	Branca a Castanho-claro ou Amarelo	Mais ou menos uniforme	Com pontos brancos	Claros	Escuros
Xanthoria parietina	X					X	X		X	
Flvoparmelia capetara				X	X		X			
Punctelia subrudecta			X		X			X		X
Evermia prunastri				X		X	X			
Physcia adscendens			X			X	X			
Normandia pulchella				X						

Tabela 3.3 – Líquenes Foliáceo (adaptado de MARQUES, 2008)

Os líquenes são bioindicadores, são organismos que respondem rapidamente a uma determinada alteração/perturbação das condições ambientais dos ecossistemas, podendo por isso funcionar como um sistema de alerta precoce. Os líquenes têm a capacidade de sobreviverem nos mais diversos ambientes mas são muito sensíveis à poluição atmosférica (SEAWARD, 1993), são utilizados como bioindicadores porque diferem dos vegetais superiores, não dependem de um sistema radicular para a absorção de nutrientes, e por possuírem cutícula reduzida ou, em geral, ausente, incorporando com facilidade altos níveis de poluição (PILEGAARD, 1978). A pureza do ar atmosférico é factor crucial à sobrevivência dos líquenes, já que estes se alimentam higroscopicamente, fixam os elementos químicos presentes, principalmente o azoto. Estes seres absorvem e retém elementos radioactivos, iões metálicos, entre outros poluentes, e isto faz com que sejam utilizados como indicadores biológicos de poluição atmosférica (NIEBOER *et al.*, 1972; SEAWARD, 1977), da chuva (HAWKSWORTH, 1990). Os líquenes são os inspectores da qualidade do ar, os líquenes resistem bem às variações de temperatura e de humidade e apresentam grande sensibilidade face às variações de poluição do ar.

Patina

Aspecto da superfície pétrea após envelhecimento natural; modificações naturais da superfície dos materiais não atribuíveis a fenómenos de degradação – variação da cor original. A Patina biológica é uma camada fina, homogénea, aderente à superfície da pedra, de natureza biológica evidente e cor variável (normalmente verde). Quando resulta da deposição de microorganismos, designa-se de película biológica (figura 3.15).

As algas e as cianobactérias têm sido investigadas pela sua capacidade de atacar quimicamente alguns dos minerais que compõem os revestimentos e de originar patinas coloridas que, em algumas situações, podem ser encaradas como inestéticas e noutras

como parte da imagem colectiva do próprio edifício. De referir que as agressões provocadas por estes organismos sobre o substrato ainda são uma matéria que gera alguma controvérsia no meio científico. As patinas resultantes das colónias de algas e cianobactérias apresentam uma coloração verde brilhante em todos os locais suficientemente húmidos e protegidos da radiação solar directa.

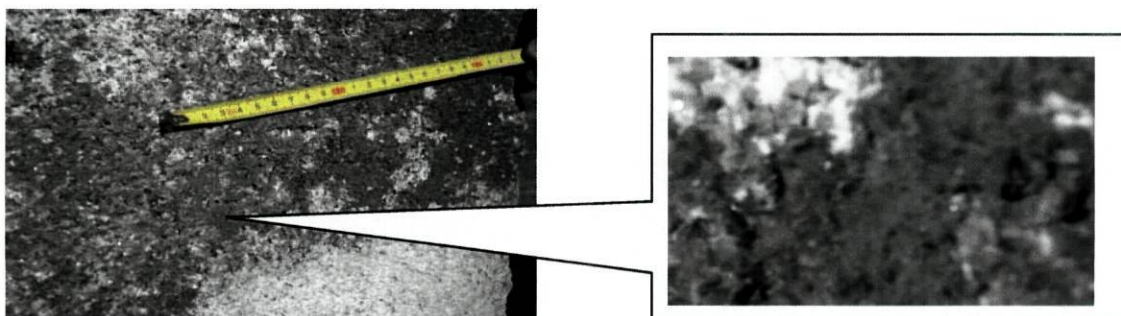


Fig. 3.15 – Presença de Patina na Fachada Sul do Farol de S. Miguel-o-Anjo, com ampliação 6x

3.2.3.3.2 Outros agentes biológicos

A decomposição microbiana de detritos orgânicos pode levar à formação do ácido húmico, que acelera a decomposição de rochas. Os excrementos dos seres vivos, com a formação do ácido fosfórico e enxofre, corroem a superfície pétrea.

As aves (gaivotas) exercem uma acção física sobre as superfícies das pedras, através de bicadas, unhadas e instalações de ninhos (os grãos de areia constituintes da pedra auxiliam a sua digestão) (figura 3.16).



Fig. 3.16 – Gaivotas cujo nome científico é *Larus fuscus graellsii* na Foz do Douro

Na Foz do Douro, a subespécie de gaivotas mais comum é a *L. f. graellsii*, que em plumagem nupcial apresenta a cabeça e as partes inferiores brancas e o manto e dorso cinzento-escuro. As asas da *L. f. graellsii* são igualmente cinzento-escuro, à excepção das primárias, de cor preta e com pequenas manchas brancas na extremidade. Em plumagem de Inverno apresenta estrias bem marcadas de cor acastanhada ao longo da cabeça, pescoço e peito. A gaivota-argêntea-de-patas-amarelas (*Larus cachinnans michahellis*), a Andorinha-do-mar comum *Sterna hirundo*, a Gaivota de asa escura *Larus fuscus*, e a Gaivota argêntea *Larus argentatus*, nidificam entre a Foz do Douro e Reserva Ornitológica de Mindelo (ROM).

O pombo doméstico *Columbia livia* é o mais conhecido pela sua proximidade no convívio com o homem, especialmente em ambiente urbano. A arquitectura urbana de edifícios, monumentos e obras de engenharia e arquitectura, oferecem uma quantidade enorme de vãos, frestas e espaços que servem adequadamente para o pouso, abrigo e formação de ninhos, protegendo os pombos das intempéries, mesmo em locais onde a falta de verde é significativa.

As patologias por acção dos agentes biológicos, em paredes com elementos de madeira está relacionada com a presença da humidade (humidade sazonal, roturas de tubos queda e algerozes, telhas partidas, etc.) e corresponde ao apodrecimento da madeira incluída nas paredes resistentes devido aos fungos de podridão (líquenes, algas, raízes – ataque biológico) ou a ataques de insectos (térmitas e carunchos), afectando a sua resistência mecânica.

3.2.4 Cartografia e localização das principais deteriorações

O Estudo realizado envolve 3 etapas, isto é, fotografia, cartografia litológica e cartografia dos tipos/formas de deterioração.

O reconhecimento litológico compreendeu a identificação do *Granito do Porto*, baseada na descrição petrográfica detalhada que inclui informações sobre cor, textura e composição da rocha.

O estado de degradação de um monumento pode ser determinado de acordo com o tipo, intensidade, extensão e distribuição dos danos. A cartografia das principais deteriorações compreende a descrição, registo e apresentação do estado das rochas. É feito por meio do esquema de classificação das formas de deteriorações proposto por FITZNER *et al.* (1996) (Tabelas 3.4 e 3.5) em quatro grupos que se distinguem pela perda de material rochoso, depósitos de material sobre a superfície da rocha, desprendimento de fragmentos e fissuras. Os grupos são diferenciados em formas principais, que agrupam formas individuais e formas transicionais.

A aplicação das formas de deterioração se baseia em aspectos morfológicos da rocha alterada, de modo que as informações sobre factores, agentes, mecanismos e causas, podem ser abordados apenas genericamente. Assim, a superfície das rochas é estudada em relação às modificações geométricas e de cor, depósitos e desprendimento de materiais etc., sendo os resultados das observações visuais correlacionados às categorias de danos (Tabela 3.4 e 3.5). A classificação das categorias de danos em cinco classes fornecem uma possibilidade complementar para estimar a extensão dos danos nas partes da decoração arquitectónica e de alvenaria dos monumentos, indicando a necessidade e a urgência de medidas a tomar (FITZNER *et al.* 1996).

Na representação gráfica da cartografia *in situ* empregam-se fotografias e/ou desenhos esquemáticos do monumento e suas formas de deterioração predominantes e subordinadas. No primeiro passo, as delimitações entre as diferentes formas de

deterioração são marcadas nas fotografias, fazendo-se um esboço preliminar, mostrando as fissuras e outras informações importantes.

No segundo passo, delimitam-se campos das formas de deterioração representados em cores e símbolos e que traduzem as diferentes intensidades do mesmo, prosseguindo-se com sua correlação com as categorias de danos e sua descrição.

A documentação sobre os monumentos e suas respectivas formas de deterioração possibilitam a amostragem representativa de certas áreas dos mesmos para investigações posteriores, tais como a realização de ensaios não destrutivos. O conhecimento do espectro das alterações é importante para investigar suas causas e mecanismos e constitui os fundamentos básicos para a formulação e implementação apropriada do planeamento de medidas de conservação.

Segundo VILES (1997), no estudo sistemático da deterioração de rochas em monumentos tem de se considerar diferentes escalas, subdividida em: nanoescala (< mm), microescala (mm a cm), mesoescala (cm a m) e macroescala (todos os ornamentos da fachada) (Quadro 3.3). A nanoescala corresponde à deterioração não visível, enquanto microescala, mesoescala e macroescala se referem à deterioração visível.

O quadro 3.3 mostra as diferentes escalas e parâmetros de avaliação da deterioração de rochas. Para cada escala, há uma série de parâmetros apropriados e métodos de investigação para avaliação da deterioração. Para a avaliação completa da deterioração de rochas se faz necessária uma cooperação interdisciplinar entre cientistas, engenheiros e arquitectos. Neste caso, o método de mapeamento é parte de uma investigação *in situ* em monumentos e enfatiza sobre deterioração de rochas em mesoescala.

Quadro 3.3 – Escala e parâmetros da deterioração de rochas (modificado de VILES 1997)

Escalas		Parâmetros	Ciências
Deterioração não visível	Nanoescala (< mm)	Mudanças nas propriedades das rochas - composição, porosidade, textura, resistência, etc.	Geociências, Ciências dos Materiais, Química, Física, Microbiologia
Deterioração visível	Microescala (mm a cm)	Descoloração, perda de massa, micromorfologia	
	Mesoescala (cm a m)	Fenómenos de alteração – formas	
	Macroescala (toda a construção)	Estabilidade estrutural, vida útil, aparência estética	Engenharia Estrutural e Arquitectura

A definição de termos para indicar as diferentes formas de alteração perceptíveis a olho nu, de modo a possibilitar a descrição das formas de alteração e o estado de conservação de monumentos pode ser baseado no esquema de classificação proposto por FITZNER *et al.* (1996) (tabela 3.4 e 3.5).

Tabela 3.4 – Formas de Meteorização com suas respectivas divisões em principais e individuais e suas abreviaturas correspondentes (Modificada de FITZNER *et al.* 1996).

Formas de Meteorização/Deterioração		Símbolo
PERDA DE MATERIAL ROCHOSO		
Relevo: mudança morfológica superficial devido à alteração parcial ou selectiva da rocha		
1	Arredondamento / entalhamento	R
2	Relevo áspero	Ra
	Perda de fragmentos compactos de rocha ou quebras devido à influência antrópica (guerra, vandalismo), à construção (stress estático, efeito de ferrugem), a causas naturais (terramotos, catástrofes) e devido à causa não reconhecível.	O
DESCOLORAÇÃO/DEPÓSITO		
Descoloração: alteração da cor original da rocha.		D
1	Coloração autóctone: alteração cromática devido à deterioração de minerais ou à acumulação de material colorido. Alóctone: migração de material colorido de componentes adjacentes para a rocha, especialmente pela presença de soluções de ferrugem e cobre.	Dc
2	Descoloração: alteração cromática devido à deterioração de minerais ou extracção de componentes (<i>leaching, washing-out</i>).	Db
	Depósitos de sujeira na superfície rochosa (por poluentes atmosféricos, por deposição de partículas de águas superficiais, por influência antrópica).	I
	Crosta: depósitos sólidos fortemente aderidos ou traços compactos de coloração variada que modificam a superfície da rocha (por ex. poluentes atmosféricos, crostas de ferro, manganês, sais).	C
	Colónia de microflora (fungos, líquenes e algas) e bactérias ou de micro organismos e plantas superiores.	B
DESINTEGRAÇÃO		
	Desintegração de minúsculas partículas minerais em forma de grãos individuais, não distinguíveis a olho nu.	G
	Flocos: destacamento de delgados fragmentos de rocha segundo o perfil da superfície.	Gp
	Escamas: placas de poucos mm de espessura, mais ou menos compacta, que se desprendem paralelamente à superfície da rocha, independente da estrutura da mesma.	F
		S
FISSURAS		
	Fissuras individuais ou sistemas de fissuras devido a causas naturais ou de construção (stress estático, ferrugem etc.). As fissuras podem ser independentes de feições estruturais tais como acamamento, foliação, bandamento etc. (tL) ou dependentes de feições estruturais (vL)	l
		tL
		vL

Tabela 3.5 – Medidas recomendadas em relação às categorias de danos (Modificada de FITZNER *et al.* 1996).

Categoria de Danos		Medidas apropriadas
I	Muito superficial	Sem medidas. Monitorização de rotina
II	Superficial	Medidas preventivas (p.ex. limpeza, hidrofobização). Monitorização cuidadosa
III	Moderado	Medidas de conservação e restauração. Monitorização Intensiva essencial
IV	Severo	Intervenção essencial. Todas as opções de conservação, restauração e substituição
V	Muito severo	Substituição /protecção

A alteração apresentada pelas rochas estará condicionada às propriedades físicas e químicas inerentes à sua mineralogia e alterações preexistentes; os defeitos gerados no processo de beneficiamento (corte e polimento); e, à interacção destes com as intempéries e as condições de fixação, manutenção e uso.

Nos revestimentos, os processos de alteração dos materiais aplicados são decorrentes da acção de agentes físicos, químicos e biológicos (CHIODI & RODRIGUES, 1997) (AIRES-BARROS, 1991, 2001) (Quadro 3.4).

Quadro 3.4 – Alteração em revestimentos (CHIODI, 1997)

Agente	Fenómeno	Acção	Consequência
Físicos	Cristalização de sais	Tensão de vazios	Fissuração
	Variação de temperatura	Dilatação/contracção	Fissuração + descolamento
	Absorção de água	Formação de manchas	Modificação das características estéticas
	Saturação/secagem	Lixiviação	Desagregação/corrosão
Químicos	Reacção a ácidos	Dissol.CO ₃ /recristalização	Corrosão
	Álcalis	Dissol.SiO ₄ /recristalização	Fissuração
	Produtos domésticos	Dissolução/absorção	Manchas
Biológicos	Fixação de vegetais inferiores	Tensão de vazios	Fissuração
	Metabolismo	Dissol.CO ₃ e SiO ₄	Corrosão e manchas

A durabilidade dos geomateriais está condicionada a certas propriedades físicas, entre as quais a porosidade e a configuração do sistema poroso, a superfície específica e as propriedades hídricas, relacionadas com o movimento dos fluidos no material rochoso (AIRES-BARROS, 2001). Do ponto de vista da alteração, o sistema poroso é considerado, como a principal característica física das rochas, pois é determinante nas demais propriedades físicas e mecânicas.

O trabalho de cartografia das deteriorações de um monumento é um processo de difícil execução por implicar morosidade e exigir pormenor. Atendendo a estes dois factores, as áreas a escolher para a cartografia são quase sempre restritas. Muitas vezes, a precisão do trabalho é comprometida pelas características arquitectónicas do monumento que impossibilitam o acesso a determinadas zonas. Fez-se o diagnóstico e cartografia dos diferentes tipos de deteriorações até uma cota de 2,50 metros nas Fachadas Nascente e Sul, com o objectivo final de compreender a génese das deteriorações observadas para que, em seguida, fosse possível aplicar medidas de conservação e restauro. Paralelamente, é importante obter uma informação sobre as litologias aplicadas no Farol de S. Miguel-o-Anjo, pelo que se executou a cartografia litológica das pedras até uma cota de 2,50 metros nas Fachadas Nascente e Sul, bem como se tentou procurar determinar as pedreiras que forneceram os materiais pétreos. Dada a inexistência de documentação sobre a proveniência do geomaterial de construção, não é lícito fazer conjecturas sobre qual a pedreira forneceu o geomaterial.

Atendendo ao tipo de elemento afectado e considerando-se como mais importantes as fachadas Sul e Nascente, a categoria dos danos está proposta em cinco graus (quadro 3.5):

- I – não há danos;
- II – danos ligeiros;
- III – danos moderados;
- IV – danos severos;
- V – danos muito severos.

A avaliação do estado de deterioração permite conhecer a extensão e urgência das medidas a serem tomadas na conservação o Farol de S. Miguel-o-Anjo (área estudada). Para haver precisão nesta avaliação, é necessário ter uma classificação das deteriorações de forma diferenciada e aplicada a todas as pedras e tipos de rochas. Nas situações em que estão presentes lado a lado mais de uma forma de deterioração, dificultando a delimitação individual, optou-se por colocar a simbologia gráfica onde se combina a forma dominante com as de menor extensão.

Quadro 3.5 – Correlação entre as formas de deterioração, categorias (Fachada Sul e Fachada Nascente) e a intensidade de danos no Farol de S. Miguel-o-Anjo (adaptado de FITZNER *et al.*, 1992)

Categoria e intensidade de danos			I	II	III	IV	V
Formas de deterioração							
Perda Material Pétreo	Desagregação Granular	Sul					
		Nascente					
	Plaquetas	Sul					
		Nascente					
	Fendas/Juntas	Sul					
		Nascente					
Descoloração e Depósitos	Colonização	Sul					
		Nascente					
	Filmes Negros	Sul					
		Nascente					

Atribuíram-se cores consoante o tipo de deterioração e o grau de intensidade dessa mesma deterioração. Na desagregação granular, aplicou-se uma escala com três graus de intensidade dessa mesma deterioração, representando-se a intensidade fraca a amarelo, a intensidade média a laranja e a intensidade forte a muito forte a vermelho. As plaquetas estão assinaladas com a cor-de-rosa, cor única. Os filmes negros com a cor violeta. A colonização biológica com a cor verde e a crosta negra com a cor negra. As lacunas a azul, as argamassas a cinza claro e as alterações cromáticas (manchas) a castanho. Foi também utilizada a simbologia gráfica das formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares segundo HENRIQUES *et al.* (2005).

3.2.4.1 Localização das principais deteriorações

A deteiorização das pedras da área em estudo do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro, fica a dever-se à presença de desagregação granular, filmes negros, colonização biológica, plaquetas e uma situação isolada de crosta negra (figuras 3.17 e 3.18).

A desagregação granular é o tipo dominante de deterioração, ocorrendo em todo o monumento em estudo, tanto na fachada sul como na fachada nascente, tendo uma representatividade muito elevada. Distribui-se a diferentes alturas, observando-se entre os 0,50 metros e os 2,50 metros de altura. A maioria das pedras apresenta desagregação granular de grau médio a forte, exibindo rugosidade em consequência da perda de grão por desgastamento. Este fenómeno origina a erosão das superfícies, provocando o recuo de parte ou toda a superfície da pedra paralelamente à superfície original. A desagregação granular na fachada Nascente é condicionada pela existência da escadaria interior do Farol de S. Miguel-o-Anjo, que interfere com a espessura das pedras de granito (são menos espessas), com a quase ausência de argamassas, assim como, com o rumo dos ventos de Setembro a Março/Abril que são predominantemente do quadrante Sudeste.

As plaquetas são de reduzida expressão na área em estudo. Podem aparecer associadas a filmes negros e são sempre afectadas por desagregação granular de intensidade média.

Os filmes negros aparecem na área em estudo até 0,50 metros de altura, zonas mais baixas das fachadas, submetidas ao salpico da chuva a partir do solo e fora da zona em estudo: em zonas expostas, mas não sujeitas nem à acção directa dos ventos associados aos episódios de precipitação nem à escorrência; zonas expostas directamente à chuva, mas não submetidas a escorrência forte. As pedras próximas ou em contacto com o solo e sujeitas ao salpico da água da chuva estão igualmente revestidas por filmes negros. Estas pedras, além de permanecerem mais tempo molhadas devido à acção conjunta da ascensão capilar de soluções e aos salpicos das águas da chuva a partir do solo, estão sujeitas à deposição de grande número de partículas provenientes do solo e transportadas pelos salpicos.

A crosta negra que foi estudada e observada no beiral da janela da fachada nascente, em área abrigada da escorrência da água. Era pouco desenvolvida, de tonalidade preta e pouco espessa.

A colonização biológica observa-se na área em estudo, quer na fachada sul, quer na fachada nascente. Nas fachadas, domina o desenvolvimento de líquenes cuja forma do talo liquémico é do tipo crustáceo (bioindicadores de locais com poluição) e do tipo foliáceo, aparecendo plantas superiores, e observou-se a existência de patinas

resultantes das colónias de algas e cianobactérias apresentando uma coloração verde brilhante. Este tipo de deterioração não parece contribuir em grande escala para a deterioração acelerada do monumento.



Fig. 3.17 – Cartografia das deteriorações existentes num sector da fachada Sul do Farol de S. Miguel-o-Anjo

Legenda

	Alteração Cromática (mancha)		Filme Negro		Vegetação
	Colonização Biológica		Junta Aberta		Crosta negra
	Desagregação Granular (fraca)		Plaqueta		Fractura
	Desagregação Granular (média)		Argamassas Recentes		Lacunas



Fig. 3.18 – Cartografia das deteriorações existentes num sector da fachada Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo

Legenda

	Alteração Cromática (mancha)		Filme Negro		Vegetação
	Colonização Biológica		Junta Aberta		Crosta negra
	Desagregação Granular (fraca)		Plaqueta		Fractura
	Desagregação Granular (média)		Argamassas Recentes		Lacunas

3.2.4.1.1 Fachada Sul

A desagregação granular é o tipo de deterioração dominante na fachada Sul na área em estudo, sendo notória na superfície das pedras uma rugosidade provocada por grãos salientes que se vão destacando, por desgastar, dos outros grãos. Esta rugosidade difere de pedra para pedra, consoante o tipo de granulometria e intensidade da deterioração presente em cada uma. A desagregação granular foi encontrada nas amostras FSMA2 e FSMA3. As plaquetas aparecem na amostra FSMA1. A alteração cromática aparece nas amostras FSMA1, FSMA3, FSMA4, embora como se verá mais adiante é somente superficial. Os filmes negros aparecem nas amostras FSMA1. A patina (película) verde aparece nas amostras FSMA7A e FSMA7B. Os líquenes estão presentes nas amostras FSMA2, FSMA5, são líquenes crustáceos de cor branca ou de talo ligeiramente fissurado aureolado, apotécios lecanorinos angulosos, de margem pouco visível, imersos nas auréolas e por vezes fundidos no talo, têm o disco negro ou esbranquiçado devido à presença de pruina. São bioindicadores de locais com poluição, têm tolerância a zonas de poluição urbana (figura 3.19). Os líquenes presentes na amostra FSMA6 são do tipo foliáceo. Os líquenes foliáceos de talo amarelos mas podendo adquirir uma tonalidade esverdeada à sombra, são os *Xanthoria parietina*, o seu diâmetro não ultrapassa os 8 – 10 centímetros, são bastantes tolerantes à poluição das zonas urbanas.

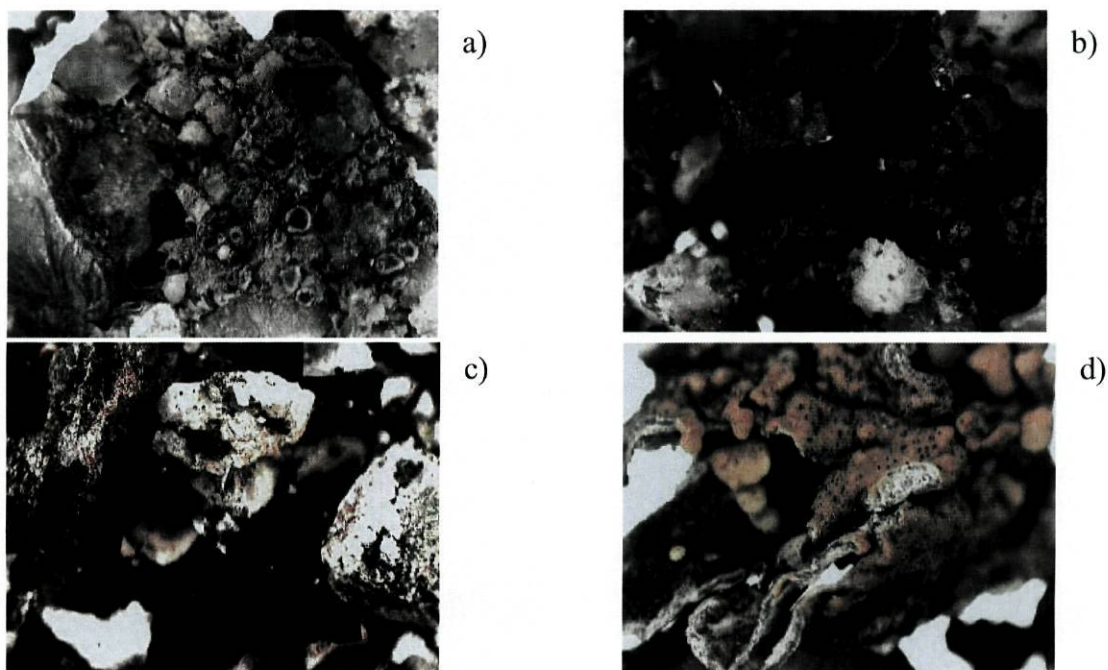


Fig. 3.19 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular das amostras de Líquenes (com ampliação de 20x): a) FSMA 2 – líquenes crustáceos de cor branca ou de talo ligeiramente fissurado aureolado; b) FSMA 5 – líquenes crustáceo de cor branca ou de talo ligeiramente fissurado aureolado e Líquenes foliáceos de talo esverdeado; c) FSMA10 – Líquenes foliáceos de talo esverdeado; d) FSMA 6 – Líquenes foliáceos de talo amarelos

Os líquenes têm alta afinidade com o ambiente em que vivem, indicando desde a humidade do ar, acidez do substrato rochoso e pH, além de demonstrarem alta sensibilidade a inúmeros tipos de poluentes. Por isso, são bioindicadores de ambientes e

da qualidade do ar e, pela capacidade de absorver e reter contaminantes atmosféricos nas suas células, funcionam também como biomonitores. Os líquenes têm sensibilidade elevada à acção do SO₂, fluoretos, ozono, óxidos nitrogenados, etc. Eles ainda podem ser usados para calcular o efeito biológico de poluentes, identificando mudanças na comunidade, ou como monitores cumulativos de contaminantes.

3.2.4.1.1 Fachada Nascente

A desagregação granular é o tipo de deterioração dominante na fachada Nascente na área em estudo, sendo notória na superfície das pedras uma rugosidade provocada por grãos salientes que se vão destacando, por desgastamento, dos outros grãos. Esta rugosidade difere de pedra para pedra, consoante o tipo de granulometria e intensidade da deterioração presente em cada uma. A desagregação granular foi encontrada nas amostras FSMA10, FSMA14 e FSMA15. As plaquetas aparecem na amostra FSMA14. A alteração cromática aparece na amostra FSMA11, embora como se verá mais adiante é somente superficial. A crosta negra aparece associada às desagregações granulares e aos filmes negros do beiral (parapeito) da janela e é circunstancial, e só está presente na amostra FSMA10. Os filmes negros aparecem nas amostras FSMA10, e FSMA14. Os líquenes presentes na amostra FSMA10 são do tipo foliáceo de talo esverdeado, são bastantes tolerantes à poluição das zonas urbanas.

A fractura no granito está preenchida com feldspato potássico (adulária) na amostra FSMA9. A adulária trata-se de uma variedade de ortoclase em paragénese de baixa temperatura, o que está efectivamente de acordo com o granito que se está a estudar.

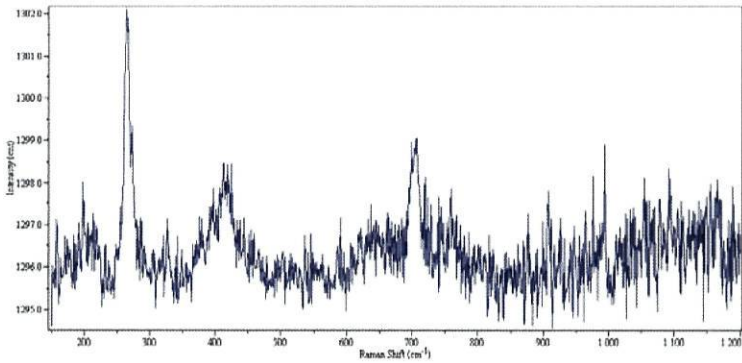
3.2.5 Estudo petrográfico das patologias

3.2.5.1. Desagregação Granular

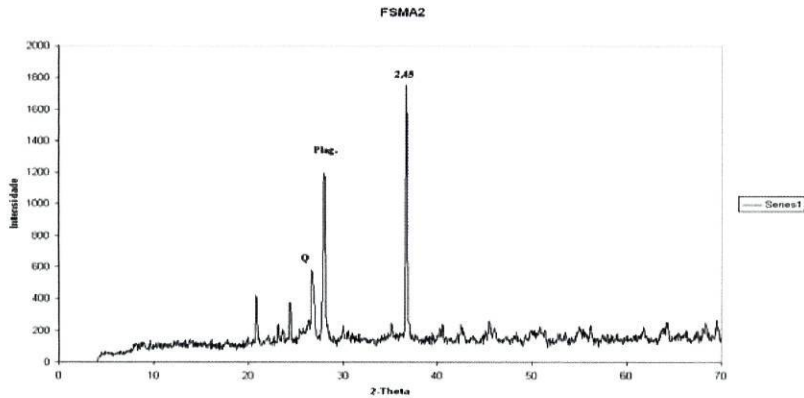
A desagregação granular foi encontrada nas amostras FSMA2, FSMA3, FSMA8, FSMA10, FSMA14 e FSMA15. Com o objectivo de determinar os minerais secundários presente na amostra de desagregação granular, realizou-se o ensaio por espectroscopia de efeito Raman, e observação ao microscópio estereoscópico binocular.

Da análise da espectroscopia de efeito Raman relativamente aos espectros às amostras FSMA 2 (figura 3.20) e FSMA 8 (figura 3.21), concluiu-se que FSMA 8 apresentava essencialmente o espectro do quartzo e que FSMA 2 o espectro da moscovite. Verificou-se ainda da análise microscópica por espectroscopia de efeito Raman que a amostra FSMA 2 continha: partículas de carbono (poluição) com óxidos, líquenes e eflorescências, NORD & TRONNER (1991, 1992) e NORD & ERICSSON (1993).

A DRX permitiu identificar, em FSMA2 os minerais constituintes do granito tais como quartzo, os feldspatos (microclina e plagioclase sódica). Em FSMA8 apareceram fases sintéticas de minerais.

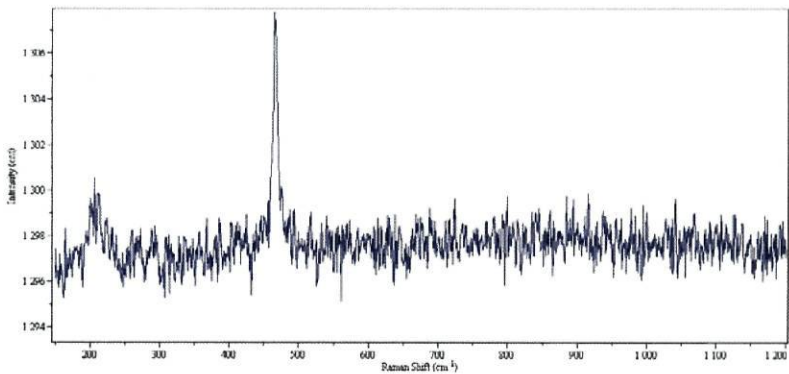


a) Espectro Raman (moscovite)

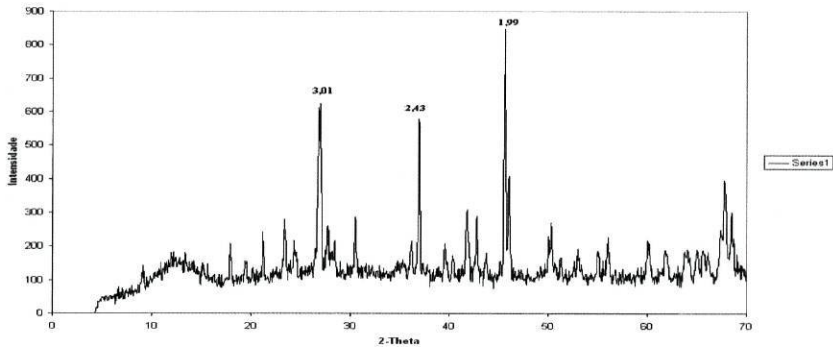


b) Diffractograma de Raio-X

Fig. 3.20 – Espectro de Raman e difractograma de Raio-X da amostra FSMA 2



a) Espectro Raman (quartzo)



b) Diffractograma de Raio-X

Fig. 3.21 – Espectro de Raman e difractograma de Raio-X da amostra FSMA 8

3.2.5.2 Plaqueta

Com o objectivo de determinar os minerais secundários presentes na amostra de plaqueta, realizou-se o ensaio de espectroscopia de efeito Raman na amostra FSMA1 e FSMA14, e observação ao microscópio estereoscópico binocular (figura 3.22).

Nas amostras FSMA1 e FSMA14 realizou-se a análise por espectroscopia de efeito Raman, é um plaqueta associada a um filme negro com eflorescências, apresenta carbono (produto da combustão de produtos petrolíferos – gasolina e diesel; cinzas de poluição), NORD & TRONNER (1991, 1992) e NORD & ERICSSON (1993). Não foi possível obter o espectro devido a flurescências.

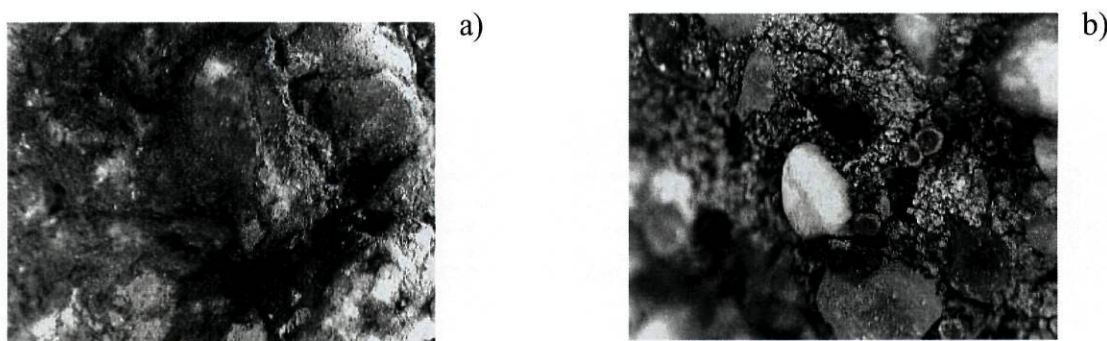


Fig. 3.22 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular das amostras de plaquetas (com ampliação de 20x): a) – FSMA1; b) – FSMA 14

As plaquetas estão associadas à cristalização de minerais de sais pouco solúveis, nomeadamente o gesso, a calcite e a halite no interior da rede porosa das pedras (figura 3.23), segundo planos paralelos à superfície das pedras. De acordo com FITZNER & HENRICHS (1994), após a queda das plaquetas, desenvolve-se o processo de formação da desagregação granular das pedras, facto observado no Farol de S. Miguel-o-Anjo.

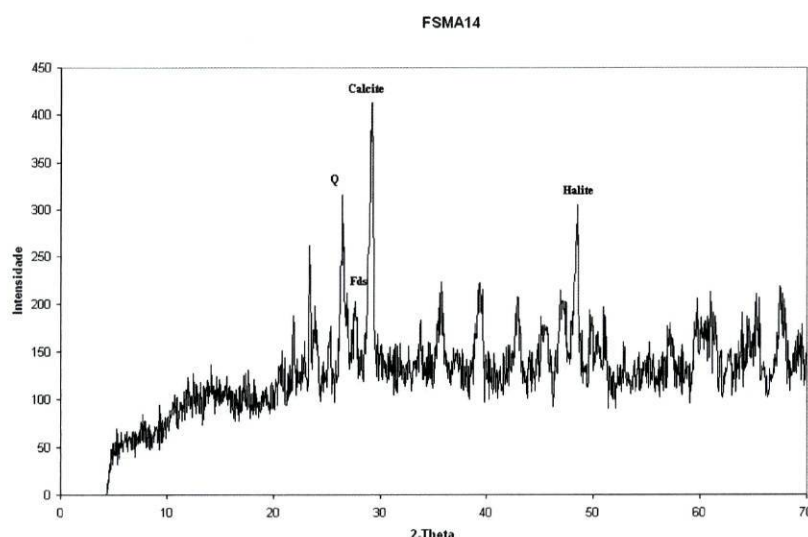
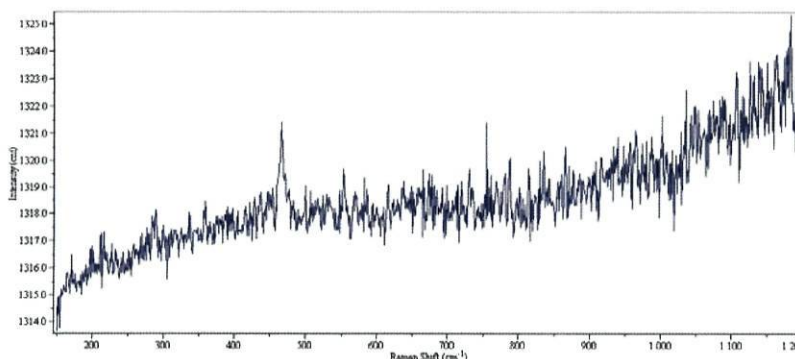


Fig. 3.23 – Difractograma de Raio-X da amostra de plaqueta – FSMA 14

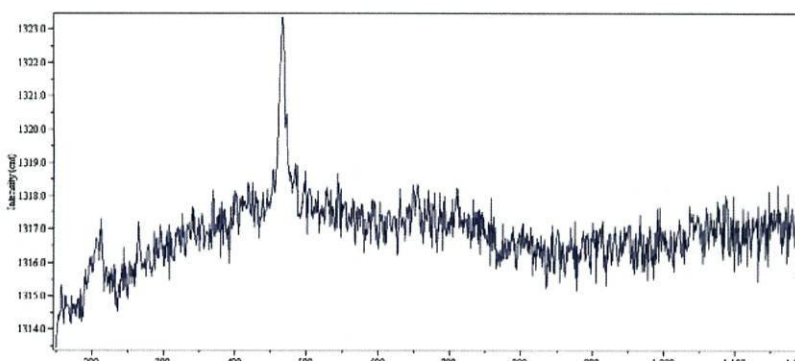
3.2.5.3 Alteração Cromática (Mancha)

Com o objectivo de determinar os minerais secundários presentes nas amostras de alteração cromática (mesoescala), realizou-se o ensaio de espectroscopia de efeito Raman na amostra, FSMA3, FSMA4 e FSMA11, e observação ao microscópio estereoscópico binocular.

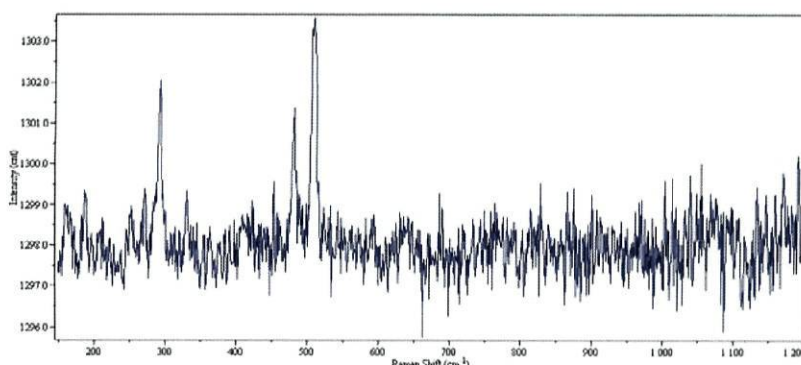
Na análise do espectro de Raman verificou-se que em FSMA 4 a capa de óxidos de ferro (Fe_3O_4 - FeO . Fe_2O_3) de lixiviação sobre o quartzo é superficial. Da análise do espectro das amostras FSMA3 e FSMA11 não existe alteração da albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - tectosilicato), esta não apresenta modificações cromáticas, logo neste granito ainda não ocorreu a alteração-modificação cromática da albite (albitização) pelos agentes da meteorização (figura 3.24). A albite destaca-se entre os minerais mais estáveis da série de GOLDICH (1938). A cor bege amarelada que o granito do Porto apresenta corresponde à alteração *in situ* (pedreira), e não a alterações cromáticas posteriores como geomaterial no Farol de S. Miguel-o-Anjo.



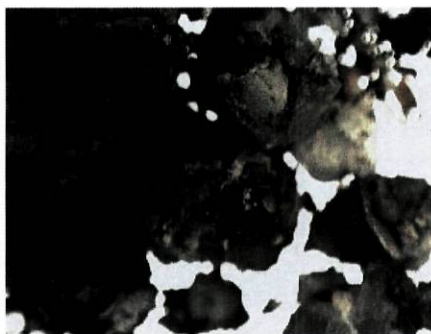
a) Espectro de Raman da amostra FSMA 4 – capas de óxidos de ferro no quartzo



b) Espectro de Raman da amostra FSMA 4 – capas de óxidos de ferro no quartzo



c) Espectro de Raman das amostras FSMA 3 e FSMA11 – albite



d) FSMA 4 – a capa de óxidos de ferro de lixiviação sobre o quartzo é superficial



e) FSMA3 – depósitos concêntricos de óxidos de ferro no granito

Figura 3.24 – Observação dos resultados da espectroscopia de Raman na amostra, FSMA3, FSMA4 e FSMA11, e observação ao microscópio estereoscópico binocular das amostras FSMA3 e FSMA4 (com ampliação e 20x.).

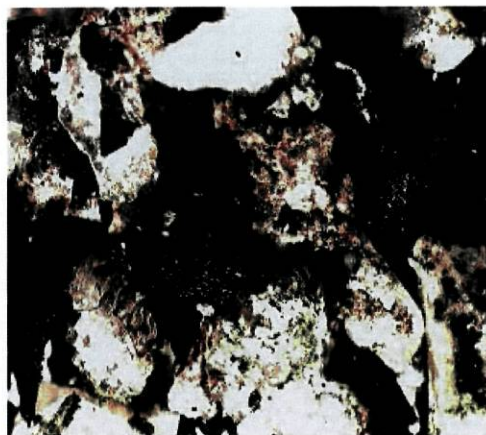
3.2.5.4 Crostas Negras

Com o objectivo de determinar os minerais secundários presentes na amostra de crostas negras FSMA10, realizou-se o ensaio Microscopia electrónica de varrimento (CryoSEM) e análise de Difracção dos raios X – DRX, e posterior observação ao microscópio estereoscópico binocular.

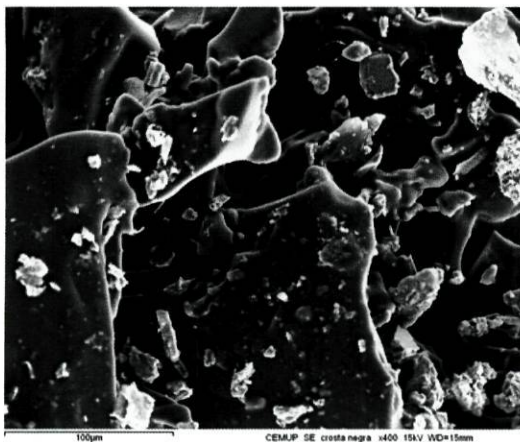
No ensaio Microscopia electrónica de varrimento (CryoSEM), aplicou-se uma energia de 15kV e uma distância focal de 15mm, verificou-se que a amostra na parte central (partícula depositada) tinha carbono, enxofre, oxigénio, sulfatos e dióxido de enxofre (SO_2). Era rodeada por alúmino silicatos de potássio/cálcio. Também se verificou a existência de ferro, titânio, magnésio e crómio. Os fenómenos de sulfatação, dissolução e recristalização dão origem ao aparecimento e formação de crostas negras (figura 3.25).



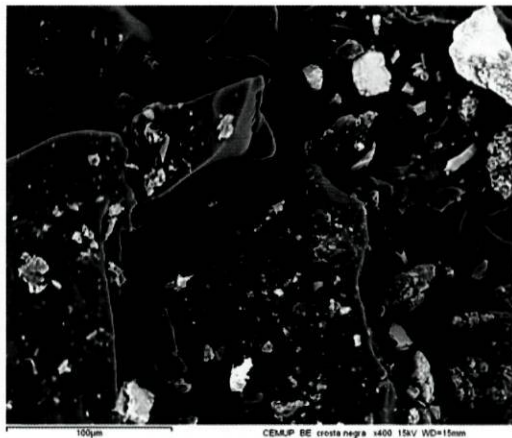
a)



b)

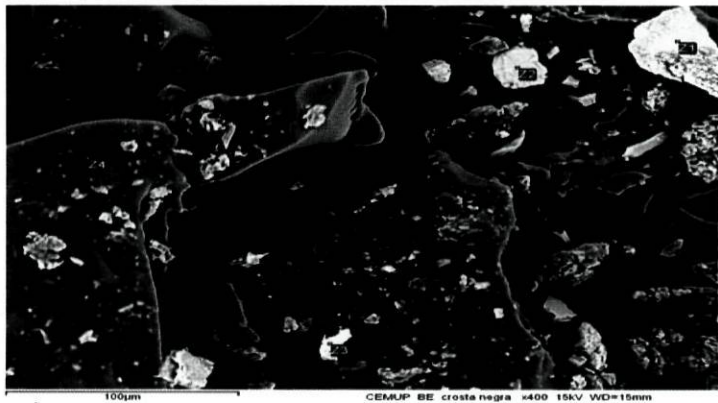


c)

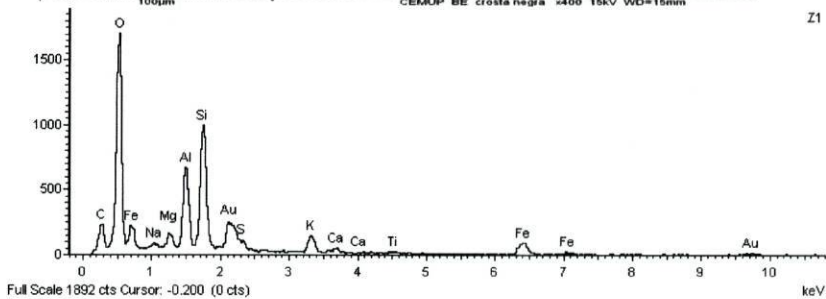


d)

e)

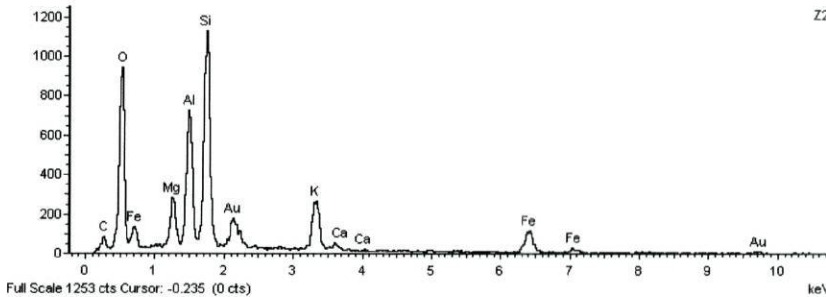


f)



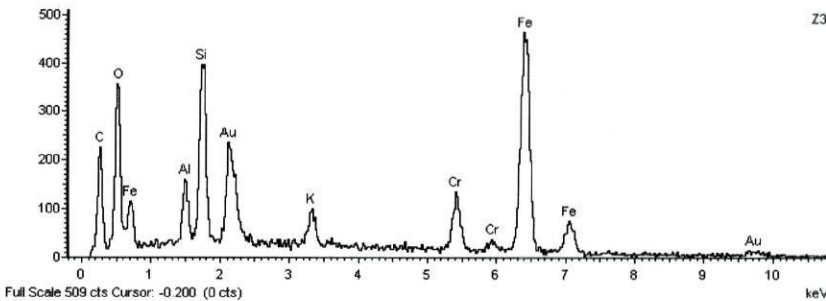
Z1

g)



Z2

h)



Z3

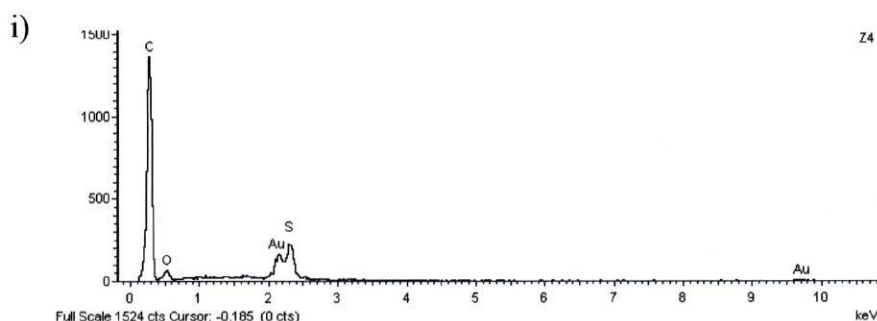


Fig. 3.25 – Principais aspectos observados na amostra da crosta negra. c) e d) - Aspectos observados em MEV-EDS de cinzas volantes carbonosas, ricas em S, Si e Al depositadas sobre gesso. e) -Localização de Z1, Z2, Z3 e Z4 onde foram efectuados os difactogramas para análise de Difracção dos raios X – DRX. f), g), h) e i) – Difactogramas de Z1, Z2, Z3 e Z4. h) e i) – Observação ao microscópio estereoscópico binocular (com ampliação 20x) da crosta negra, e líquenes associados (a, b) e das cinzas volantes associadas.

A microscopia electrónica de varrimento da amostra no porta-amostras, permitiu estudar por EDS (espectrometria dispersão de energias) a composição elementar das substâncias neoformadas. As análises demonstraram a influência de aerossóis marinhos, composição das rochas e argamassas e dos poluentes atmosféricos na deterioração e formação de crosta no granito. Muito da deterioração é associado especificamente a presença de sais, tais como halite (NaCl) e o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). O facto da crosta negra de gesso ser capaz de se desenvolver no parapeito da janela da Fachada Nascente em um ambiente húmido é testemunha da eficácia dos níveis de poluição local, especialmente da deposição de partículas, e da reduzida lavagem pela chuva desta fachada do Farol de S. Miguel-o-Anjo. A formação de crostas negras conduz a modificações na composição mineralógica da superfície da pedra. São mais densas e fortes do que a pedra hospedeira e neste caso está associada a outro tipo de deterioração a colonização biológica com a presença de líquenes esverdeados.

3.2.5.5 Filmes Negros

Com o objectivo de determinar os minerais secundários presente na amostra do filme negro, realizou-se o ensaio espectroscopia de efeito Raman na amostra FSMA1 e FSMA14, e observação ao microscópio estereoscópico binocular (figura 3.26). A amostra FSMA1 é um filme negro que não apresenta espectro no ensaio de espectroscopia de efeito Raman devido a fluorescências.



Fig. 3.26 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular da amostra FSMA1, com ampliação 20x

A DRX permitiu identificar, além dos minerais constituintes do granito tais como quartzo, mica alterada (vermiculizada), microclina e plagioclase sódica (albite), também quantidades vestigiais de gesso, e lepiesferas de chumbo nas películas de filmes negros, mas como se fez uma única DRX não pode ser conclusivo. Difractograma de FSMA1 (figura 3.27).

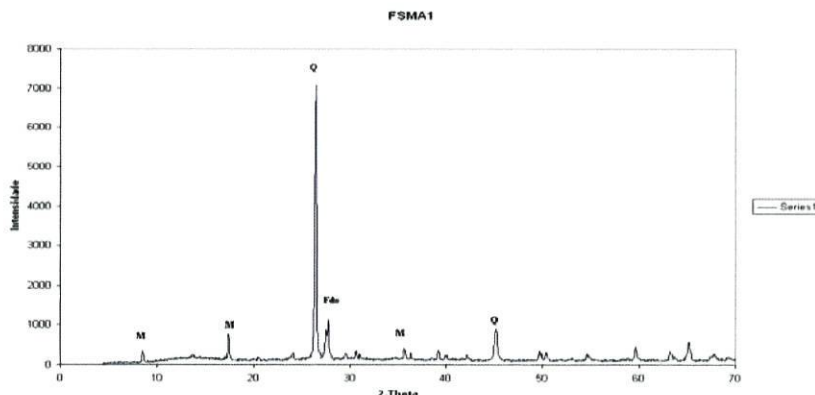


Fig. 3.27 – Difractograma de Raio-X da amostra FSMA1

Na amostra FSMA14 realizou-se a análise de espectroscopia Raman, é um filme negro com eflorescências, apresenta carbono (produto da combustão de produtos petrolíferos – gasolina e diesel; cinzas de poluição). Não foi possível obter o espectro devido à eflorescência (figura 3.28), NORD & TRONNER (1991, 1992) e NORD & ERICSSON (1993).

Nas amostras FSMA 1 e FSMA 14 observadas ao microscópio estereoscópico binocular é nítido o contraste entre os filmes negros e os substratos graníticos. As existências destes filmes negros apontam para uma origem eminentemente antropogénica, resultante do impacte da poluição urbana, marítima (existência de uma entrada de barcos no rio Douro, e local de oficina de barcos) e da poluição atmosférica industrial. Observa-se também a existência de colonização biológica, mas esta não é significativamente importante (figura 3.28a).

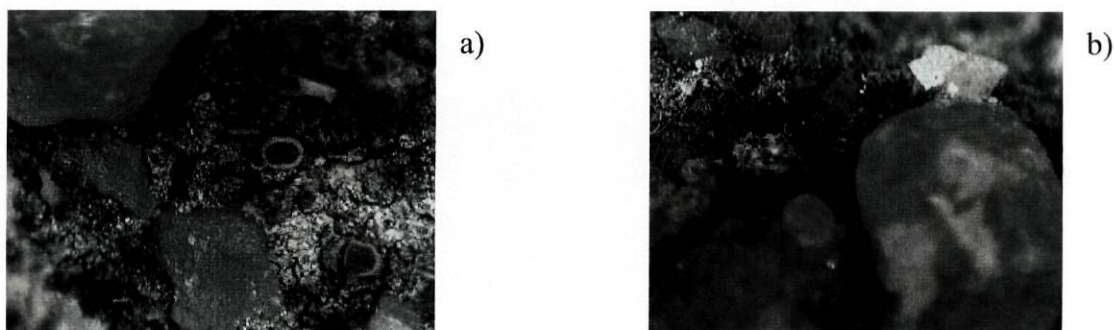


Fig. 3.28 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular da amostra FSMA 14, com ampliação 20x.

A amostra FSMA 12 é do Beiral do Farol de S. Miguel-o-Anjo (área não estudada). Os filmes negros da amostra FSMA 12 no beiral do Farol de S. Miguel-o-Anjo são em grande parte resultantes da actividade do farol, isto é, as luzes do farol eram constituídas

por labaredas de archotes ou de fogueiras de lenha resinosa e carvão de lenha, ardendo livremente e constituíam o clarão avermelhado e fumoso (figura 3.29).

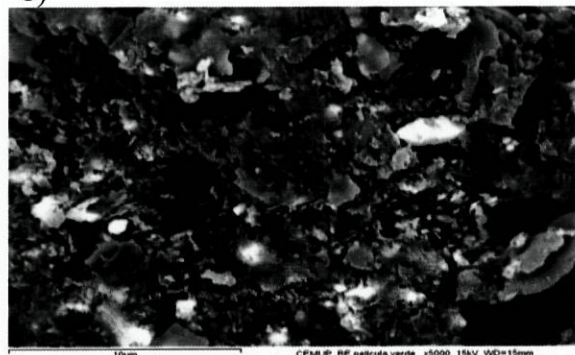


Fig. 3.29 – Amostra FSMA12, com filmes negros numa matriz granítica, com ampliação 20x.

3.2.5.6 Película Verde

Com o objectivo de determinar os minerais secundários presentes na amostra de patine verde (película) FSMA7A e FSMA 7B, realizou-se o ensaio Microscopia electrónica de varrimento (CryoSEM) e análise de Difracção dos raios X – DRX, e posterior observação ao microscópio estereoscópico binocular.

No ensaio Microscopia electrónica de varrimento (CryoSEM), aplicou-se uma energia de 15kV e uma distância focal de 15mm, verificou-se que a amostra (base) é rica em carbono e sulfato de bário. O mineral presente é a Barite (sulfato de bário – BaSO_4) (figura 3.30).



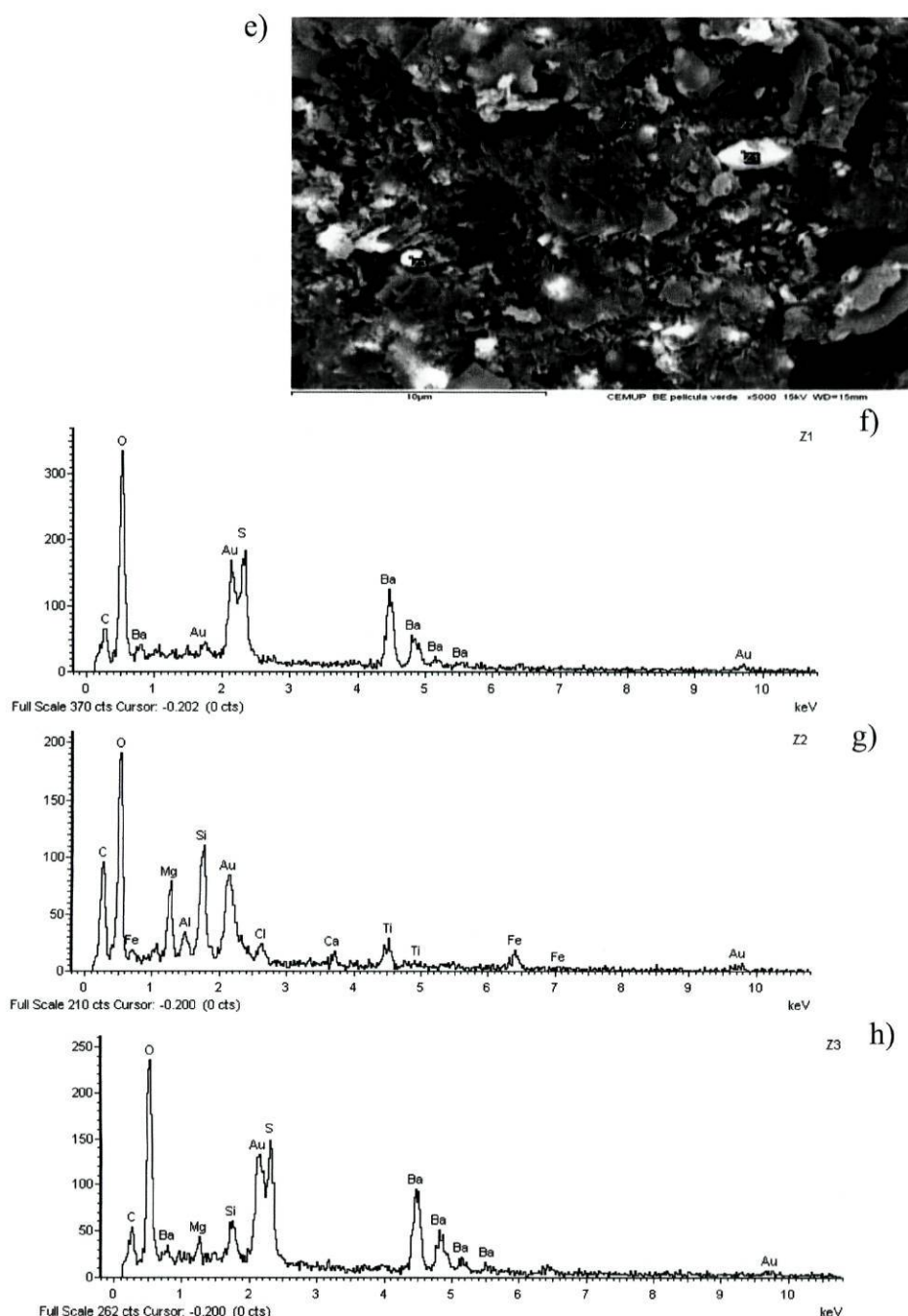


Fig. 3.30 – Principais aspectos observados na amostra da patine verde (película verde). c) e d) - Aspectos observados em MEV-EDS de película sulfato de bário, ricas em Fe, Silicatos de magnésio (Si e Mg) e cloretos de sódio. e) -Localização de Z1, Z2 e Z3 onde foram efectuados os difactogramas para análise de Difracción dos raios X – DRX. f), g) e h) – Difactogramas de Z1, Z2 e Z3. a) e b) – Observação ao microscópio estereoscópico binocular da patine verde no granito, com ampliação 20x.

A microscopia electrónica de varrimento da amostra no porta-amostras, permitiu estudar por EDS (espectrometria de dispersão de energias) a composição elementar das substâncias neoformadas. A composição elementar destas substâncias corresponde sobretudo a sulfato de bário e a silicatos de magnésio, ferro, cloro, sódio, e cálcio.

3.2.5.7 Outras análises na espectroscopia de efeito Raman

Foram efectuadas análises na espectroscopia de efeito Raman nas amostras FSMA 9 e FSMA 20 (figura 3.31, 3.32 e 3.33).

Em FSMA 20a) o seixo é de quartzo e aparecem eflorescências (figura 3.32). Em FSMA 20 b) aparecem partículas de carbono (poluição) e calcite, (figura 3.33). Segundo NORD & TRONNER (1991, 1992) e NORD & ERICSSON (1993), as partículas de carbono, são compostos orgânicos resultantes da poluição urbana e industrial.

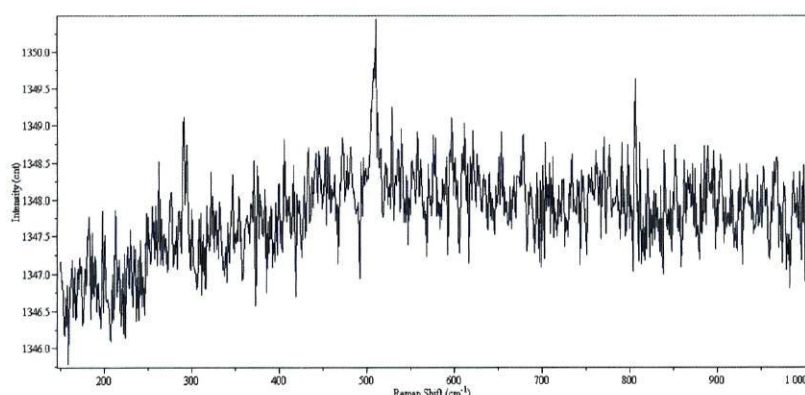


Fig. 3.31 – Espectro de Raman da amostra FSMA 9 – adularia

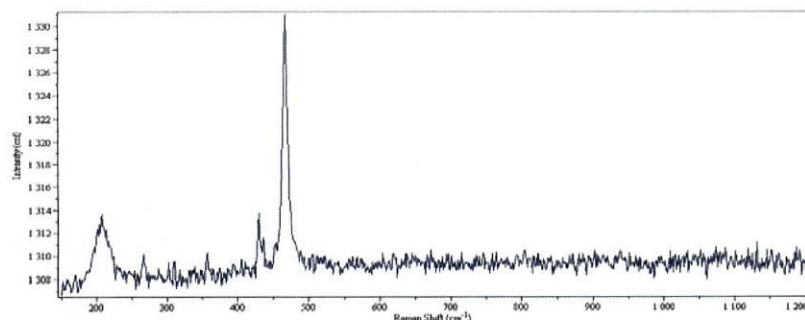


Fig. 3.32 – Espectro de Raman da amostra FSMA 20 a) – quartzo com eflorescências

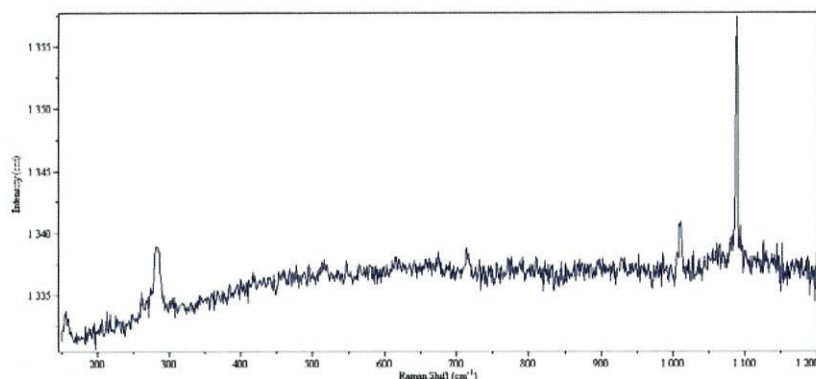
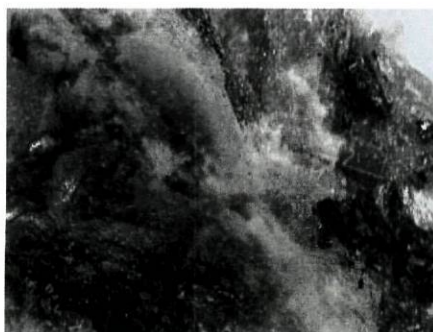


Fig. 3.33 – Espectro de Raman da amostra FSMA 20 b) – quartzo com partículas de poluição.

Em FSMA 9 o feldspato potássico de preenchimento da fractura é a adularia. A adularia é um feldspato potássico (KAlSi_3O_8), variedade de feldspato alcalino gerado em fase de cristalização hidrotermal de baixa temperatura do magma, no ponto triplo

eutético (RODRIGUES & BRAVO, 1983) de baixa temperatura (600° - 700°), aparece associada a uma mineralização/metalização do granito. A presença da adulária no granito e os elevados valores de Al, Na, K e albite quase pura (deve corresponder a uma percentagem igual ou superior a 90% da composição global das plagioclases segundo a classificação de JUNGE & BROUSSE, 1959) confirmam que o granito em questão é o *Granito do Porto*. O espectro da amostra FSMA 9 indica que estamos numa transição entre a microclina e a adulária com predominância desta última. O granito peraluminoso de duas micas, granito do Porto, foi em grau variável afectado por fenómenos de alteração tardi-magmática caracterizado pela moscovitização dos feldspatos (sobretudo a plagioclase) e da biotite, e/ou pela albitização e, em menor grau, pela microclinização/adularização dos feldspatos. A plagioclase presente em FSMA 11 é uma albite quase pura. Na observação ao microscópio estereoscópico binocular da amostra de FSMA 9 verificou-se que era um mineral de feldspato numa matriz granítica, e que a amostra de seixo de quartzo da amostra FSMA20 continha partículas de carbono (figura 3.34).



a) FSMA 9



b) FSMA 20

Fig. 3.34 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular das amostras FSMA9 e FSMA 20, com ampliação 20x.

3.2.6 Estudo mineralógico das deteriorações

A deterioração de um monumento tem a sua própria história, ARNOLD (1996). Está dependente dos sistemas de minerais de sais solúveis presentes e da proveniência desses mesmos sistemas.

A degradação pelos minerais de sais solúveis é reconhecida como sendo uma das primeiras causas na deterioração da arquitectura histórica, com origem em fenómenos naturais e também em fenómenos antropogénicos. ARNOLD (1996) escreve que “*salts are a condition of life*”, referindo que todas as águas que circulam no meio ambiente são soluções salinas formadas essencialmente por Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- e Cl^- .

Desde há muito que se sabe que os sais se acumulam nas paredes, aceitando-se até que a maioria das paredes contém minerais de sais solúveis que provocam danos nas fissuras do granito.

Estes danos têm origem na produção de tensões resultantes da cristalização dos minerais de sais solúveis. Enquanto que ARNOLD & KUENG (1985) referem, tendo como base resultados obtidos em laboratório, que todos os sais solúveis produzem deteriorações fortes nos materiais porosos, ARNOLD & ZEHNDER (1988) escrevem que, apesar de todos os estudos já publicados, pouco se sabe sobre os processos reais que ocorrem *in situ*. Certo é que não se pode compreender a deterioração pelos minerais de sais solúveis sem entender o seu processo de cristalização.

Devido aos ciclos de secagem-molhagem, os iões dos sais produzem forças de tensão física resultantes da cristalização desses sais nos poros, acabando por romper a estrutura interna dos minerais constituintes da pedra devido às pressões exercidas pela cristalização sobre as superfícies das paredes dos poros e microfissuras das rochas. Segundo HAMMECKER (1993) e BEGONHA (2001a), a sua acção destrutiva é maior à medida que: aumenta a sua solubilidade; aumenta a sua higroscopicidade; aumentam as forças de cristalização que se desenvolvem no respectivo processo de crescimento; aumenta o número de ocorrências de ciclos de cristalização/dissolução; aumenta o número de ocorrências de ciclos de cristalização/deliquescência.

A deterioração vai depender das pressões exercidas no interior da rede porosa e da maior ou menor facilidade de dissolução e cristalização dos minerais de sais solúveis (BEGONHA, 2001a). ALVES (1997), pelo contrário, escreve que não se observa uma relação directa entre a pressão de cristalização esperada para um dado sal e o efeito deteriorante geralmente observado, não sendo os minerais de sais solúveis com maior força de cristalização que provocarão as deteriorações mais destrutivas.

Por outro lado, a utilização de determinados materiais pode originar um processo de deterioração. Assim, o uso de sulfato de cálcio nas argamassas tem uma longa tradição, tendo sido usado nas Pirâmides do Egipto. As argamassas de cimento Portland, utilizadas durante o século XX, são fonte de iões K^+ e Na^+ (HAMMECKER, 1993; BEGONHA & SEQUEIRA BRAGA, 1993), contribuindo para uma fortíssima degradação da pedra.

ALVES & SEQUEIRA BRAGA (2000) referem que dos estudos realizados sobre os minerais de sais solúveis presentes em edifícios, o aspecto mais marcante é a presença difundida do gesso em todo o tipo de rocha, em todas as latitudes e em todo o tipo de condições ambientais. O gesso presente estará associado a soluções que podem resultar da combinação entre várias fontes antropogénicas e geológicas, já que o cálcio e o sulfato são iões comuns na água das chuvas, resíduos animais e águas circulantes (ALVES, 2000).

Os resultados do estudo de BEGONHA *et al.* (1995, 1996) sobre as águas das chuvas do Porto permitiram concluir que estas poderão ser a principal fonte de gesso das crostas negras, placas e desagregação granular nos monumentos graníticos da cidade, já

que este sal solúvel é o único sulfato a cristalizar em quantidades significativas a partir da água da chuva.

Segundo WEBER *et al.* (1996) e CAMUFFO (1996), a solubilidade do gesso aumenta fortemente com a presença de cloretos e/ou nitratos de Na, K ou Mg. Acresce ainda BEGONHA (1997, 2001a) que, sendo a solubilidade do gesso máxima para a humidade relativa de 90%, cada aumento ou diminuição da humidade relativa conduz à precipitação de alguns cristais de gesso, uma vez que a solubilidade do gesso na solução aquosa de cloreto de sódio tem início para humidade relativa de 75%.

Apesar da força de cristalização do gesso e da solubilidade serem inferiores às da halite, pelo facto de se formar em maior quantidade, torna-se o mineral de sal solúvel que mais deterioração origina nos monumentos e edifícios, desde que ocorram três condições que favoreçam uma cristalização mais superficial deste mineral (ALVES, 1997): menor sobressaturação das soluções, o que acontece nas zonas superiores quando ocorre fraccionamento por precipitação de gesso nas zonas inferiores; alimentação capilar suficientemente excedentária para garantir uma cristalização sub-superficial; presença de outros iões que aumentem a solubilidade do gesso.

Contudo, a intensidade da deterioração parece não estar relacionada com a quantidade de gesso presente (BEGONHA, 1997, 2001a), pois por ser menos solúvel, precipita em poros de maiores dimensões, não introduzindo tensões significativas nas paredes da rede porosa.

Segundo ARNOLD (1984), os sais solúveis que são transportados em solução por capilaridade porque estão fortemente ligados à migração de água nas paredes, ocorrendo como soluções aquosas ou cristalizados nos poros e/ou nas superfícies. A sua concentração vai ocorrer nos locais onde a água se evapora aquando do seu movimento numa determinada direcção, ou seja, nas zonas mais altas da humidade ascensional, lateralmente a zonas onde a água corre ao longo das superfícies e em zonas onde a água atinge a superfície e se evapora.

ARNOLD & ZEHNDER (1988, 1989) preconizaram um modelo de zonamento vertical segundo as solubilidades crescentes dos minerais de sais solúveis com base nas análises feitas na Igreja do Convento de Mustair (Suíça), em zonas submetidas a ascensão de soluções salinas por capilaridade. Este modelo pressupõe a cristalização de minerais de sais menos solúveis, como sulfatos e carbonatos, a cotas inferiores e a cristalização de minerais de sais mais solúveis, cloretos e nitratos a cotas superiores.

Este zonamento sequencial só se confirmou em estudos realizados em monumentos do Norte de Portugal para os monumentos da cidade de Braga (ALVES, 1997), o Mosteiro de São Miguel de Refojos (BEGONHA, 2000) e Mosteiro de Grijó (BEGONHA & SEQUEIRA BRAGA, 2000).

A inexistência de zonalidade segundo o modelo para soluções ascendentes por capilaridade revela-se nos estudos feitos para o Hospital de Santo António no Porto (BEGONHA, 1997, 2001a), Igreja de São João de Tarouca (BEGONHA, 2002a), Igreja de São Pedro de Rates (BEGONHA, 2002b, 2002c), Igreja Matriz de Vila do Conde (BEGONHA, 2003a), Igreja Matriz de Espinho (BEGONHA, 2003b), Igreja de Santa Maria de Leça do Mosteiro de Leça do Balio (MOUTINHO DA SILVA, 2005). Para a Igreja de São Gonçalo de Amarante (BEGONHA, 2004b) este fenómeno só se revelou como sendo a principal causa da deterioração do monumento para a fachada principal Oeste, não se observando nas outras paredes estudadas.

Em diversos monumentos, as zonas das paredes que se apresentam mais danificadas correspondem a áreas onde se encontram soluções com halite, um dos sais mais importantes em todo o processo de deterioração, com o volume molar mais baixo e a pressão de cristalização mais elevada e que segundo HAMMEKER (1993) e FASSINA *et al.* (1996a), o tornam o mineral de sal solúvel que provoca as desagregações granulares mais devastadoras nas rochas onde se encontra.

O momento da precipitação para os sais minerais em solução ocorre quando a solução se torna saturada relativamente a um sal em particular, e podendo acontecer em qualquer uma das zonas referidas anteriormente. Os iões são transportados diluídos em soluções aquosas, concentrando-se e acumulando-se quando ocorre a evaporação do solvente, a água. ARNOLD & ZEHNDER (1989) referem que os sais podem penetrar nos materiais e circular ou percolar através das cavidades e poros.

CASAL PORTO (1989) descreve um modelo interpretativo possível para o processo de deterioração do granito nos monumentos. Esse modelo seria formado por três etapas, em que numa primeira etapa, teria início a acumulação de minerais de sais menos solúveis, fundamentalmente o gesso, sobre a zona mais superficial da pedra. Na segunda etapa, por interacção mecânica com o gesso, a camada superficial modificaria as suas propriedades físicas, nomeadamente o valor da sua porosidade. Como resultado, o material começaria a sofrer desagregação cada vez mais intensa. O consequente aumento das infiltrações de humidade e de minerais de sais solúveis em solução causaria a formação de placas. Por fim, na terceira etapa, o aumento progressivo da concentração de minerais de sais mais solúveis formaria perfis de distribuição desses sais em função da sua solubilidade relativa em zonas determinadas, isto é, segundo o modelo proposto por ARNOLD & ZEHENDER (1988, 1989) do zonamento vertical segundo as solubilidades crescentes dos minerais de sais solúveis. Como resultado final obtêm-se diferentes tipos de deterioração em que cada um desses tipos é o resultado de diferentes condições de cristalização dos minerais de sais solúveis.

Segundo AMOROSO & FASSINA (1983) e GOUDIE & VILES (1997), o desenvolvimento de métodos para reduzir a deterioração dos edifícios pelos sais, tem sido um processo lento, baseado em análises e observações de campo, dependentes de laboratórios e de modelos criados em computador. Recolher, rever, sintetizar e dar

conhecimento dos dados actuais é uma tarefa difícil. Compreender e encontrar maneiras de reduzir os efeitos dos danos causados pelos sais é de importância vital para a conservação do património cultural.

Segundo BEGONHA (2001), o efeito dos sais solúveis é o mais comum na génese das deteriorações da pedra. Os minerais de sais solúveis mais frequentes são os sulfatos, cloretos, nitratos e carbonatos simples ou duplos de sódio, potássio, cálcio e magnésio, os nitratos de amónia e os oxalatos de cálcio.

Para uma dada temperatura e um determinado grau de sobressaturação, os sais com menores volumes molares são os que registam maiores pressões de cristalização. No Quadro 3.6 são apresentadas as composições químicas e os volumes molares de alguns dos principais minerais de sais solúveis presentes em monumentos.

Quadro 3.6 – Principais minerais de sais solúveis – composições químicas e volumes molares. Adaptado de BEGONHA (2001)

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	VOLUME MOLAR (cm ³ /mol)
HALITE	NaCl	27,06
CALCITE	CaCO ₃	36,80
SODA NITER	NaNO ₃	37,11
ANIDRITE	CaSO ₄	46,31
THENARDITE	Na ₂ SO ₄	53,00
GESSO	CaSO ₄ ·2H ₂ O	74,21
NITER	KNO ₃	47,69
APTITALITE	NaK ₃ (SO ₄) ₂	125,44
SINGENITE	K ₂ Ca(SO ₄) ₂ ·H ₂ O	126,32
EPSOMITE	MgSO ₄ ·7H ₂ O	140,82
MIRABILITE	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	217,70
BARITE	BaSO ₄	38,40

Atendendo aos valores dos volumes molares apresentados e à observação dos danos provocados pela cristalização dos diversos minerais de sais solúveis nos monumentos, conclui-se que: a halite é o sal que possui a pressão de cristalização mais forte, sendo potencialmente o sal que provoca as desagregações mais devastadoras nas rochas onde precipita; os minerais anidros têm pressões de cristalização nitidamente superiores aos minerais hidratados correspondentes, facto bem evidente na thenardite e mirabilite; se bem que as cristalizações do niter e da calcite não sejam normalmente responsáveis por qualquer fenómeno de degradação, as pressões de cristalização desenvolvidas são elevadas e mesmo superiores às da thenardite e mirabilite que originam, no entanto, fortes degradações; de entre os minerais sulfatados hidratados e, portanto, de entre os que têm maior probabilidade de se formarem, o gesso é o que apresenta pressões de cristalização mais fortes, apesar da sua pressão de cristalização ser nitidamente inferior

à da halite, o gesso, em consequência de se formar em muito maior quantidade que a halite, é o mineral de sais solúveis que maiores prejuízos causa nos monumentos.

Estudos efectuados em monumentos construídos com as mais diversas rochas mostraram que as deteriorações da pedra resultam quase sempre da presença e acção, não de um único mineral de sais solúveis, mas de dois ou mais.

A origem dos sais solúveis é diversa, podendo ser endógena ou exógena relativamente às edificações. Os sais solúveis endógenos encontram-se sobretudo nas argamassas. Os sais solúveis exógenos podem advir de fontes distintas, no caso do Farol de S. Miguel-o-Anjo, designadamente: do ar, em resultado da presença de partículas de dimensão muito reduzida (formando aerossóis) provenientes quer do mar (sobretudo cloreto de sódio e também sulfatos) quer da poluição antropogénica (sulfatos, nitratos e carbonatos) quer do solo de regiões desérticas fustigadas por ventos fortes (carbonatos e sulfatos); da chuva, devido à dissolução ou incorporação não só de gases resultantes da poluição atmosférica, mas também de partículas existentes no ar; do solo, como consequência da transformação de resíduos orgânicos, da água freática.

3.2.7 Estudo das argamassas

A argamassa cumpre a função de preencher vazios, agregar os blocos de pedra de forma a constituir um elemento heterogéneo coeso proporcionando uma eficaz distribuição de esforços e de permitir o posicionamento aparelhado entre os blocos. Embora as argamassas sejam consideradas como materiais auxiliares, e supostamente de menor relevância, verifica-se que desempenham um papel fundamental nas alvenarias antigas. No caso do Farol de S. Miguel-o-Anjo a presença ou ausência de argamassas assume um papel importante na protecção das alvenarias contra os agentes atmosféricos.

Os resultados da observação ao microscópio estereoscópico binocular das amostras FSMA13 e FSMA17 (figura 3.35), permitiram verificar que as argamassas antigas existentes são de cal aérea do tipo calcítica e que na sua formulação foram utilizados dois tipos de agregados distintos. Por um lado, agregados formados por areias do granito do Porto e compostos essencialmente por feldspatos, quartzo, micas (biotite e moscovite), tem clorite, calcite e caulinite, entre outros, agregados de composição heterogénea compostos por minerais de origem magmática (quartzo e feldspato) e rochas metamórficas, provavelmente provenientes de areia de rio. Não se detectou a existência de pozolanas (materiais siliciosos ou silico-aluminosos que por si só não endurecem debaixo de água, mas que finamente divididos e na presença de humidade reagirão quimicamente com o hidróxido de cálcio (cal hidratada – $\text{Ca}(\text{OH})_2$) a temperaturas vulgares formando compostos com propriedades cimentícias). A argamassa da amostra FSMA 17 é da parede Norte interior e apresenta sais de cloretos no seio dos agregados de feldspatos, quartzo e moscovite.



a) FSMA13 – Argamassa da fachada Nascente



b) FSMA17 – Argamassa da parede Norte com sais de cloretos

Fig. 3.35 – Observação ao microscópio estereoscópico binocular das argamassas presentes no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro, com ampliação 20x.

Da observação ao microscópio estereoscópico binocular das argamassas presentes no Farol de S. Miguel-o-Anjo, verificou-se que apresentam uma microestrutura típica de argamassas de cal antigas, com agregados bem embebidos nas matrizes. Foi possível identificar a natureza dos agregados, principalmente litoclastos de quartzo, feldspatos e mica. Os agregados empregues nas argamassas apresentam uma composição mineralógica uniforme e correlacionáveis com a geologia local.

Foi feita uma identificação dos compostos cristalinos por difractometria de raios X (DRX) da amostra FSMA13 que deu origem a um difractograma como o apresentado na figura 3.36, constituído por picos de difracção com posições características (medidas na escala horizontal) e intensidades relativas igualmente características (medidas na escala vertical). Como a cada composto cristalino corresponde um padrão de difracção diferente e característico, é possível fazer-se a identificação de um composto cristalino comparando o seu difractograma com os difactogramas de referência disponíveis na literatura. No caso da amostra estudada FSMA13 formada por mistura de vários compostos cristalinos, a análise é mais complexa porque ocorrem sobreposições de alguns picos de diferentes constituintes, e nesta situação torna-se difícil a identificação de componentes minoritários. FSMA13 apresenta calcite (carbonato de cálcio), gesso (sulfato de cálcio), quartzo, micas, feldspato, clorite e vestígios de pickeningite (sulfato de ferro).

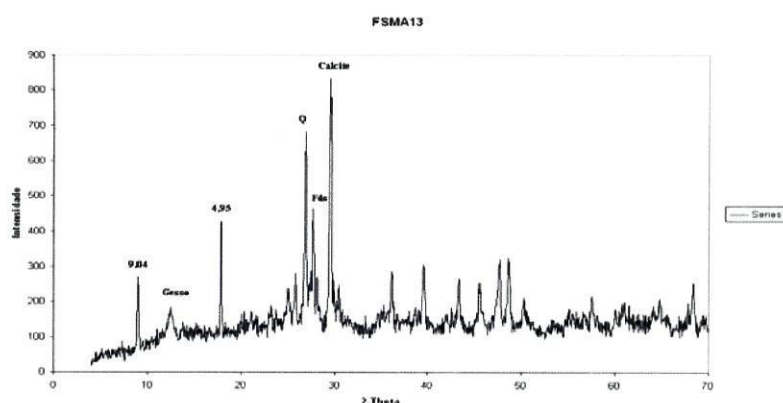


Fig. 3.36 – Difractograma da amostra de argamassa FSMA 13 do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro.

3.3 Minerais de sais solúveis identificados pelo DRX e pelo Cryo-SEM/EDS

Identificaram-se, através da Difracção do Raio-X (DRX) e da Microscopia Electrónica de Varrimento a baixa temperatura e Microanálise de Raio-X (Cryo-SEM/EDS), nas amostras do Farol de S. Miguel-o-Anjo, vários minerais de sais solúveis e associações minerais de sais solúveis, cuja cristalização é responsável pelo aparecimento da maioria das deteriorações observadas.

O estudo das amostras de desagregação granular, filmes negros, crostas negras, películas verdes, alterações cromáticas, placa/plaquetas e de argamassas, evidenciou a presença generalizada de minerais solúveis nas paredes deste monumento. No Quadro 3.7, apresentam-se as paragénese dos minerais de sais solúveis identificados.

Identificaram-se diversos minerais de sais solúveis, nomeadamente: sulfatos – gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e barite (BaSO_4); cloretos – halite (NaCl) e carbonatos (CaCO_3).

Quadro 3.7 – Minerais de sais solúveis identificados por DRX e CryoSem/EDS no Farol de S. Miguel-o-Anjo

DETEORIZAÇÃO	LOCALIZAÇÃO	MINERAIS DE SAIS SOLÚVEIS
CROSTA NEGRA	Fachada Nascente	Gesso
PELÍCULA VERDE	Fachada Sul	Barite
FILME NEGRO	Fachada Sul	Gesso
ARGAMASSA	Fachada Nascente	Calcite + Gesso
PLAQUETA	Fachada Nascente	Halite

3.4 Conclusões

Os estudos realizados no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro (Porto), permitiram retirar as conclusões a seguir referidas.

As pedras utilizadas na construção do edifício estudado apresentavam meteorização herdada de pedreira, facto confirmado pela presença de gibsite e caulinite, minerais secundários indicadores de um grau elevado de evolução mineralógica.

A desagregação granular aparece associada sobretudo às seguintes áreas: zonas húmidas não lixiviadas, submetidas à ascensão capilar de soluções salinas a partir do solo; zona exposta principalmente a ventos chuvosos de sul e sudeste; zonas adjacentes a juntas com ausência de argamassas, e outras zonas onde foram utilizadas argamassas de cimento Portland.

As plaquetas são uma deterioração de transição entre a desagregação granular e as placas, formando-se em zonas húmidas, não lixiviadas mais baixas das fachadas, sujeitas à ascensão capilar de soluções salinas a partir do solo.

A crosta negra formou-se sob uma zona ou pormenor arquitectónico saliente relativamente ao plano da fachada – peitoril da janela, numa área de evaporação que permanece húmida não abrigada da chuva.

Os filmes negros aparecem associados às seguintes zonas: zonas expostas directamente à chuva, mas não submetidas a escorrência forte; zonas mais baixas das fachadas, submetidas ao salpico da chuva a partir do solo.

A deterioração visível à mesoescala das alterações cromáticas, não foi confirmada nas análises efectuadas na espectroscopia de Raman. A capa de óxidos de ferro (de oxidação dos elementos metálicos) de lixiviação sobre o quartzo é superficial, e a albite das pedras (geomaterial) de granito de cor bege-amarelado não sofreu alterações cromáticas.

As argamassas antigas de cal são constituídas por um ligante de calcite sendo os agregados formados por arenas do granito do Porto, formadas por grãos de quartzo, microclina, plagioclase sódica, micas, caulinite e gibsita. O gesso foi igualmente identificado.

4. IMPACTE DA POLUIÇÃO AMBIENTAL

4.1 Introdução

Um dos maiores problemas ambientais que presentemente enfrentamos, e sobre o qual tem havido um intenso debate, assim como sobre as respectivas causas, é o problema da chuva ácida. Geralmente tem-se concentrado a atenção sobre os efeitos adversos da queda da chuva acidificada sobre os solos, as árvores, os rios e os lagos.

Actualmente, o principal responsável por esta aceleração da degradação da pedra é considerado ser a chuva ácida (AIRES-BARROS, 1991). A chuva ácida ocorre quando certos poluentes – principalmente óxidos de enxofre provenientes da queima do carvão e do petróleo para fins domésticos e industriais, e óxidos de azoto provenientes dos escapes dos veículos, se combinam à luz do sol com a humidade atmosférica para formarem um cocktail de químicos que inclui ácidos sulfúrico e azótico. Para esta chuva ácida também podem contribuir partículas poluentes (partículas de carvão não queimado e de cinzas volantes) que caem no terreno sob a forma de “deposição seca”, a reacção de gases com a pedra molhada e a chamada “deposição oculta” consequente do orvalho e do gelo. Todos eles se combinam para criarem o fenómeno da deposição ácida. A deposição oculta é particularmente importante para os edifícios, porque é tipicamente mais ácida do que a própria chuva ácida, podendo atacar as zonas resguardadas que não são atingidas pela queda da chuva e porque podem ser produzidos sais potencialmente prejudiciais pela sua reacção com a pedra, os quais não são facilmente removidos por lavagem (BEGONHA, 2001).

A pedra natural é um dos nossos geomateriais de construção mais antigos, e é frequentemente olhada como um símbolo de permanência. No entanto, ela não é absolutamente durável e a exposição ao ambiente, ao longo de muitos milhares de anos, provoca o aparecimento de uma eventual degradação. A velocidade com que essa desintegração ocorre varia de acordo com o tipo de pedra e com as condições ambientais, pelo que deve ser recordado que cortar-se e colocar-se uma pedra numa edificação não a imuniza contra os processos naturais de degradação ambiental. Contudo, tornou-se evidente durante o último século que, em ambientes poluídos, os teores de degradação da pedra são fortemente acelerados, pelo que a expectativa de vida natural dessa pedra pode ficar drasticamente reduzida desde os milhares de anos para apenas dezenas, em certos casos e em certos ambientes urbanos.

A degradação ambiental salina tem sido alvo de atenção crescente por parte dos investigadores. A partir de observações em cidades e de estudos laboratoriais, tornou-se evidente que os danos causados pela degradação ambiental salina ocorrem de uma forma não muito diferente daquela que tem lugar quando a água congela no interior da

pedra. No entanto, actualmente parece que a degradação ambiental salina é, provavelmente, o mais importante agente da degradação da pedra nas cidades. Isto é assim porque a cristalização de sais e os danos a ela associados podem ocorrer sempre que uma pedra contaminada com sais é molhada e depois seca, enquanto que o congelamento ocorre com uma frequência relativamente pequena e muitas pedras não são susceptíveis à dissolução.

Embora os factores intrínsecos às características dos materiais sejam em parte responsáveis pelo seu comportamento face à meteorização, a verdade é que actuam sob estreita dependência das condições ambientais. Com efeito, são elas que definem, em termos globais, os processos de alteração que vão dominar em dada área, a velocidade das reacções envolvidas, a intensidade da alteração resultante, bem como a profundidade que atinge.

Apesar destas características resultarem de uma acção combinada entre todos os elementos que definem o meio, o clima parece exercer um papel decisivo, até pelo facto de condicionar as outras variáveis. Tanto a drenagem como a topografia e a vegetação tendem a impor "*variações de detalhe*", contribuindo principalmente para atenuar ou acelerar os mecanismos desencadeados pelas condições climáticas.

Podemos considerar que o clima, através dos valores de precipitação e temperatura, controla de forma vinculada a velocidade da alteração e a consequente remoção dos produtos dela derivados. Deste balanço resulta uma determinada intensidade de alteração e ritmo erosivo, tanto mais forte quanto mais fácil a libertação dos produtos alterados e consequente exposição de minerais frescos (BEGONHA, 1989).

A influência da contaminação atmosférica no processo de degradação das pedras de construção é difícil de quantificar, pois outros factores, como por exemplo o envelhecimento natural, podem mascarar essa influência. Os iões da atmosfera mais importantes na deterioração das pedras são o SO_4^{2-} , presente nos aerossóis, o dióxido de carbono (CO_2), os óxidos de azoto (NO_x) e o ião amónia (NH_4^+). Todos estes iões referidos afectam diversos tipos de pedra como o calcário, o mármore, o granito e o arenito, sendo a sua acção controlada por múltiplos factores inerentes à natureza da própria rocha, incluindo a sua heterogeneidade natural e variabilidade, e também pelo ambiente em que a rocha se encontra exposta, designadamente condições atmosféricas locais como a poluição do ar e a proximidade do oceano (BEGONHA, 2001).

A poluição atmosférica com origem na queima dos combustíveis fósseis carvão e petróleo na indústria e nos motores dos veículos provocou a acidificação do ar que contribuiu para a deterioração acelerada da pedra a partir de meados do século XX. A progressiva degradação do património construído verificado a partir de então por acção da poluição atmosférica conduziu a uma chamada de atenção a nível mundial para a necessidade de se tomarem medidas de conservação do património cultural edificado em pedra natural.

KLEMM & STIEGER (2002), referem que são factores antropogénicos a fonte dos sulfuretos, substâncias que levam à formação de sais de sulfato presentes na poluição atmosférica através das chuvas. LEFÈVRE & AUSSET (2002) quantificam os efeitos da poluição atmosférica nas pedras e a presença de SO₂ e seus efeitos, referindo o comportamento do gesso na interface entre os materiais pétreos e a atmosfera. Reconhecem que apesar dos grandes avanços nos últimos anos, muito pouco se sabe ainda sobre a influência dos poluentes atmosféricos nos materiais pétreos.

A poluição atmosférica é essencialmente promovida pela contaminação urbano-industrial, com o aumento de certos componentes no ar, como é o caso do dióxido de enxofre, que em combinação com o vapor de água origina a chuva ácida, o óxido de azoto que permite a formação de “*smog*” fotoquímico e também a acidificação da chuva, o monóxido e dióxido de carbono, que possibilitam as modificações climáticas, o ozono que diminui a filtragem às radiações ultravioletas, entre outros gases bastante prejudiciais (BEGONHA, 2001). Em locais junto à costa como o Farol de S. Miguel-o-Anjo, para além da poluição atmosférica há ainda a agravante da poluição das águas. Assim, é importante monitorizar a acção dos cloretos e do ácido clorídrico. Na Foz do Douro, é ainda muito importante ter em conta as amplitudes térmicas, bem como a presença constante de humidade. A água é um elemento bastante prejudicial para as rochas, principalmente, devido ao fenómeno de condensação/evaporação, que acontece não só à superfície da pedra, mas também nos seus poros e fissuras. O preenchimento dos poros e das fissuras faz-se através deste fenómeno, mas também por capilaridade, com a ascensão das águas subterrâneas e pela acção directa da precipitação.

4.2 Qualidade do ar na Foz do Douro no Porto

Apesar dos recentes desenvolvimentos na produção de combustíveis mais amigos do ambiente e da constante preocupação na construção de veículos menos poluentes, a poluição atmosférica resultante do tráfego rodoviário é um problema crescente nas áreas metropolitanas, tanto nos países em desenvolvimento como nos países desenvolvidos. A circulação automóvel provoca a emissão de partículas para a atmosfera, quer de uma forma directa, quer pela existência de transformações gás-partícula. Actualmente, um dos aspectos mais críticos associados à qualidade do ar relaciona-se com o elevado número de excedências da concentração de partículas na atmosfera que são detectadas em Portugal pelas redes de monitorização da qualidade do ar relativamente à legislação em vigor (INSTITUTO DO AMBIENTE, 2003).

A origem dos gases que exercem uma acção agressiva contra os materiais pétreos encontra-se basicamente no ar contaminado e, de uma forma menos importante, na acção biológica de certos fungos e bactérias. A poluição do ar resulta principalmente da queima deficiente dos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e seus derivados) utilizados nomeadamente nos automóveis, centrais térmicas e indústrias. A Cidade do Porto e particularmente a Foz do Douro encontra-se perto da refinaria de petróleo e

complexo petroquímico da Petrogal, e a cidade do Porto encontra-se também perto da Fábrica da Maia da Siderurgia Nacional, que libertam grandes quantidades de poluentes para a atmosfera.

Numa atmosfera contaminada, os gases agressivos mais importantes são basicamente os dióxidos de enxofre (SO₂), carbono (CO₂) e azoto (NO₂) e o monóxido de azoto (NO). Não obstante, numa atmosfera não poluída também existe um certo conteúdo de dióxido de carbono, ainda que consideravelmente inferior ao existente no ar contaminado.

Mais importante, pela sua maior agressividade e volume, é o efeito do dióxido de enxofre. Este gás tende a associar-se a partículas sólidas e líquidas suspensas no ar, formando aerossóis, dando origem ao ácido sulfúrico (H₂SO₄) através das seguintes reacções:



As agressões causadas aos materiais pétreos por efeito do dióxido de enxofre têm lugar a partir da interacção ácido sulfúrico – pedra. Estas agressões são particularmente importantes em pedras constituídas por carbonato de cálcio (calcários, mármore e arenitos calcários, etc.), onde se dá a transformação da calcite em gesso com um aumento de volume.

A produção de ácidos como consequência da acção de fungos, líquenes e bactérias, ainda que de menor importância, deve-se fundamentalmente: aos ácidos oxálico e cítrico dos fungos e líquenes de que resulta sobretudo a formação dos oxalatos de cálcio; às oxidações do azoto (N₂) do ar por parte de certas bactérias que com o concurso da água das chuvas se transformam em nitratos; às oxidações de sulfuretos por acção de determinadas bactérias, dando origem a sulfatos.

O vento tem não só uma acção mecânica, servindo como meio de transporte de partículas que exercem impacto sobre as superfícies pétreas, erodindo-as, mas também interfere na velocidade de evaporação das soluções salinas, influyendo na cristalização dos sais ao aumentar a velocidade de evaporação da água capilar por eliminação da água superficial.

Os danos causados pelas variações de temperatura são essencialmente resultantes das acções mecânicas devidas a mudanças de volume como consequência das dilatações e contracções que provocam nos materiais pétreos. Resultam ainda da interferência das variações de temperatura nos ciclos de cristalização/dissolução e

hidratação/desidratação dos sais solúveis em consequência das modificações da velocidade de evaporação das soluções salinas e também na humidade relativa do ar.

A transferência do calor no interior das pedras dá-se principalmente por condução, forma típica de transmissão do calor nos corpos sólidos. Todavia, devido à radiação solar, em que o calor é transferido por radiação electromagnética, as rochas podem apresentar aumentos de temperatura de 30°C ou mais em relação à temperatura do ar. Esta solicitação, repetida diariamente, origina roturas na superfície das pedras que, com o tempo, se transmitem em profundidade.

O efeito mais comum de danos por mudanças de temperatura produz-se entre zonas de sol e sombra assim como entre camadas superficiais e profundas. A diferença de temperatura entre zonas ou camadas dá origem ao aparecimento de tensões que podem conduzir à rotura.

A concentração de partículas mostra-se segundo BEGONHA (1997) fortemente influenciada por fenómenos de lavagem, sendo mais baixa em períodos de chuva. Num mesmo local, a variação sazonal não é muito pronunciada. No entanto, a contribuição das partículas finas foi em média maior no Inverno, e a concentração das partículas grosseiras foi mais elevada durante o Verão.

4.3 Acção das águas das chuvas

A água apresenta dois papéis fundamentais no processo de degradação: ora actua como um reagente químico, participando nas reacções e conduzindo à formação de minerais hidratados; ora actua como fluido, promovendo a mobilidade dos iões intervenientes nas reacções químicas. Está presente sob a forma de: água líquida proveniente da chuva, do solo, e de condensações; soluções salinas; gelo; vapor de água.

As medidas de conservação têm sido essencialmente baseadas na protecção das pedras relativamente à acção da água, por ser o factor ambiental causador dos mais importantes processos químicos, físicos e biológicos de deterioração que afectam os monumentos.

A água é um elemento sempre a ter em atenção nos estudos sobre a deterioração das rochas, pois está permanentemente presente, variando apenas o seu estado físico e a quantidade, função do equilíbrio com o meio envolvente. O meio poroso da rocha e a quantidade de água existente nessa mesma rocha facilitam o surgir das diferentes deteriorações que podem afectar as pedras de construção dos monumentos. A onnipresença da água acaba por se manifestar na deterioração, induzindo reacções de hidratação, ciclos de gelo/degelo, cristalização de minerais de sais solúveis quando

estão presentes soluções salinas e colonização biológica, incluindo micro organismos que podem dar origem a ácidos que atacam a pedra.

O estado de conservação em que se encontram muitos monumentos revela que estes não estão imunes à deterioração. BEGONHA *et al.* (1995) e SEQUEIRA BRAGA *et al.*, (1996) referem a água da chuva como a principal fonte de halite e de gesso nos tipos de deterioração presentes nos monumentos da cidade Porto e a principal fonte de halite nos monumentos da cidade de BRAGA. ALVES *et al.* (1996) concluem que as patologias observadas nos monumentos graníticos de Braga estão associadas a soluções salinas.

Como exemplo, referem-se os casos da deterioração da pedra em edifícios de interesse histórico na província da Corunha (CASAL PORTO, 1989), no edifício da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (OLIVEIRA, 2001; BEGONHA & ALMEIDA, 2003), na Igreja de São Pedro de Rates (BEGONHA, 2002b) e na Igreja Matriz de Vila do Conde (BEGONHA, 2003a), em que a maior parte dos danos observados se devem a ciclos de dissolução/cristalização ou deliquescência/cristalização de minerais de sais solúveis no interior da rede porosa da rocha, dependendo da presença de maior ou menor quantidade de água líquida ou de variações da humidade relativa do ar.

O principal agente agressivo na alteração dos materiais pétreos é, sem dúvida, a água, que actua sobre os minerais, por um lado, fornecendo uma fase fluida e, portanto, promovendo a mobilidade dos iões necessários para as reacções químicas e, por outro lado, comportando-se como um novo componente químico, tornando possível a formação de minerais hidratados. Assim, além da acção que pode exercer por si mesma, é o agente agressivo indispensável para que os gases e os sais minerais exerçam a sua acção destrutiva.

Um material contém sempre uma determinada quantidade de água que não é fixa, dependendo do equilíbrio que se estabelece entre ele e o ambiente que o rodeia. É sobretudo a variação da quantidade de água (sob as formas líquida e/ou de vapor) nos materiais que provoca os diversos estados patológicos nas construções. Os fenómenos migratórios da humidade são os que conduzem às modificações das propriedades dos materiais, fenómenos a que as pedras são particularmente sensíveis, dada a sua estrutura porosa. Sendo a água um dos agentes agressivos de maior incidência na patologia das construções, parece necessário referir a sua origem, modos de penetração e movimento nas pedras. A água presente nas edificações de pedra pode ter tido origem durante a sua construção, no seu interior ou exterior.

As técnicas empregues na fase de construção de um edifício introduzem água nas pedras. A aplicação das argamassas é disto exemplo. No seu fabrico, é essencial a utilização de água de modo a realizarem-se as reacções de hidratação do cimento, necessárias ao endurecimento da argamassa. Além disso, as pedras em contacto com as argamassas devem ser previamente molhadas para evitar que o material pétreo absorva

da argamassa a água necessária à hidratação do cimento. As próprias pedras podem conter água em resultado da extracção, transporte e armazenamento.

A água exterior provém da precipitação e do terreno. A água da chuva alcança as fachadas e coberturas dos edifícios, penetrando através da estrutura porosa das rochas, das juntas de construção e das fendas. A precipitação sob a forma de neve introduz ainda uma carga nas coberturas.

A água contida no terreno seja freática, seja por infiltração das águas da chuva ou de saneamento, pode constituir um agente agressivo importante se a sua drenagem não tiver sido devidamente considerada no projecto.

A água pode penetrar ou atravessar as pedras quer actuando sob pressão quer simplesmente por contacto, sem pressão exterior. A penetração da água sem pressão hidráulica pode dar-se por capilaridade ou por difusão. Em presença de uma pressão hidráulica, o mecanismo de transporte dominante é a permeabilidade. De entre os mecanismos referidos, a capilaridade é, sem dúvida, o mais importante no que se refere à deterioração das pedras.

A água ao congelar aumenta o seu volume em cerca de 10%, exercendo uma certa pressão sobre as superfícies que a contêm. Tensões internas podem ser causadas por este processo, que é tanto mais eficiente quanto maior o número de vezes que for repetido. Assim, a congelação da água tem maior importância em regiões de climas moderados, onde a água congela e descongela muitas vezes, num intervalo de tempo relativamente curto.

4.4 Acção do aerossol marinho

Nas áreas costeiras o aerossol atmosférico apresenta na sua composição gotículas de pequena dimensão provenientes da água do mar e da composição salina.

Estes sais podem depositar-se directamente sobre a superfície pétrea do Farol de S. Miguel-o-Anjo (deposição via seca) ou podem ser solubilizados e transportados pelas águas das chuvas, podendo igualmente contactar com as superfícies pétreas (deposição por via húmida) e, caso as condições termohigrométricas sejam favoráveis, precipitar no seu interior (AIRES-BARROS, 2001).

Os sais são essencialmente constituídos por sódio, cloro, magnésio, potássio, cálcio e sulfatos (Tabela 4.1). O sódio representa cerca de 86%.

O efeito do aerossol marinho depende de dois mecanismos: hidratação e cristalização. No caso dos cloretos, os seus efeitos são mais nocivos nos materiais de construção (argamassas e materiais pétreos) do que os resultantes de outros sais, uma vez que a sua acção se faz sentir até zonas mais internas. A deposição do aerossol

marinho, não se mantém constante ao longo do ano, isto é, são observadas variações sazonais na taxa de deposição dos principais iões.

Tabela 4.1 – Composição aproximada da água do mar (AMARAL & CORREIA, “Química”, 12º ano de escolaridade, Porto Editora, 1998.)

Espécie	Concentração/mol.l ⁻¹	Espécie	Concentração/mol.l ⁻¹
Cl ⁻	0,55	Na ⁺	0,47
SO ₄ ²⁻	0,028	Mg ²⁺	0,054
HCO ₃ ⁻ /CO ₃ ²⁻	2,3x10 ⁻³	Ca ²⁺	0,010
Br ⁻	8,3x10 ⁻³	K ⁺	0,010
F ⁻	7x10 ⁻⁵	Sr ²⁺	9,1x10 ⁻⁵
H ₃ BO ₃	4,3x10 ⁻⁴		

Em contraste com os efeitos dos contaminantes atmosféricos antropogénicos, o enriquecimento em sais marinhos nos monumentos históricos é um processo que se vem a verificar há longa data. O decaimento decorrente da acção do aerossol marinho é bastante acentuado em monumentos nas zonas costeiras ou na foz dos rios, como acontece com o Farol de S. Miguel-o-Anjo, onde as eflorescências salinas são caracterizadas pela presença de gesso.

4.5 Acção das Aves

A população de gaivotas (larídeos) aumentou exponencialmente na cidade do Porto, provocando prejuízos quando poluem o Farol de S. Miguel-o-Anjo e os telhados do Edifício do Marégrafo e da torre anexa à Capela-Farol, e entopem também os algerozes com as penas (figura 4.1).

A avifauna, nomeadamente os pombos e as gaivotas, são responsáveis por degradações significativas de muitos dos monumentos portugueses localizados em meios urbanos atlânticos. Em muitos casos, as populações de pombos/gaivotas são consideradas pragas pois encontram um meio muito propício para a procriação devido à existência de abrigo, abundância de alimentos e ausência de predadores. A acumulação das fezes deste seres é um dos principais problemas estéticos em vários monumentos portugueses. Além disso, por serem fortemente ácidas, as fezes atacam quimicamente diversos materiais, entre os quais as rochas, e constituem ainda uma das principais fontes (na maioria dos casos a principal) de compostos de azoto (amónia) e fósforo que servem de substrato para o desenvolvimento da microflora heterotrófica.

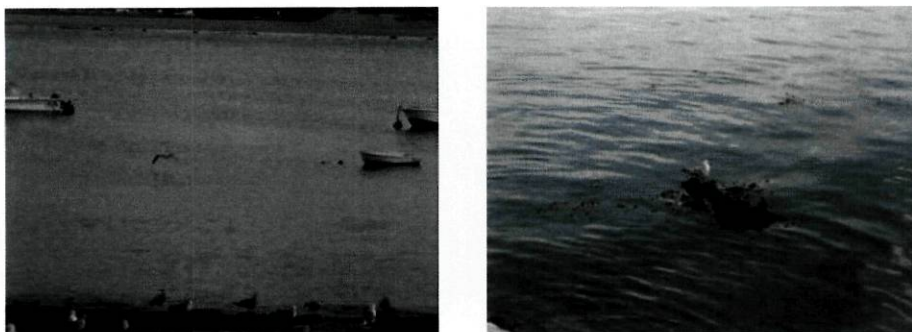


Fig. 4.1 – População de *Larus fuscus graellsii* (gaivotas) na Foz do Douro

4.6 Variações climáticas em Portugal

As primeiras observações meteorológicas instrumentais realizadas em Portugal são tardias (últimas três décadas do século XVIII, em particular os anos 80), quando comparadas às efectuadas em outros países da Europa (Inglaterra e França, por exemplo).

Na ausência de informação meteorológica numérica, o estudo do clima de Portugal anterior àquele período tem vindo a ser baseado noutro género de informação, nomeadamente a recolhida em fontes documentais descritivas, as quais já se revelaram de grande utilidade na reconstituição do clima em Portugal, nomeadamente durante o último quartel de Seiscentos e no século XVIII (ALCOFORADO *et al.*, 2000; TABORDA *et al.* 2004).

O trabalho de ALCOFORADO (1999) trata, justamente, das variações climáticas em Portugal, no período entre 1675 e 1715 (Late Maunder Minimum). Nas respectivas conclusões afirma-se que “as condições térmicas e pluviométricas observadas em Portugal provam que, no SW da Europa, as situações sinópticas terão sido, durante o LMM, semelhantes às actuais, apenas com uma maior frequência de ocorrência de situações anticiclónicas no Inverno e Primavera, às quais estava associada advecção de ar continental”, que se traduziu na existência de Invernos bastante frios.

A “Pequena Idade do Gelo” estendeu-se de 1400 a 1850. Correspondeu a uma fase em que as manchas solares quase desapareceram (“mínimo de Maunder”). Durante este período verificou-se um acentuado arrefecimento climático, que correspondeu a um avanço, por vezes muito rápido, dos glaciares de montanha (LE ROY LADURIE, 1983). O Pequena Idade do Gelo definitivamente estabelecida na Europa por volta do ano 1400 terá terminado no final do século passado (figura 4.2). Aparentemente, os séculos XVI e XVII foram os mais inclementes (DIAS *et al.*, 1994) e o nível médio do mar atingiu provavelmente posição sensivelmente inferior à actual. Na sequência deste período mais frio, em que a distribuição sazonal das chuvas era diferente da actual, ocorreu intensa sedimentogénese e o litoral apresentou comportamento regressivo bem marcado.

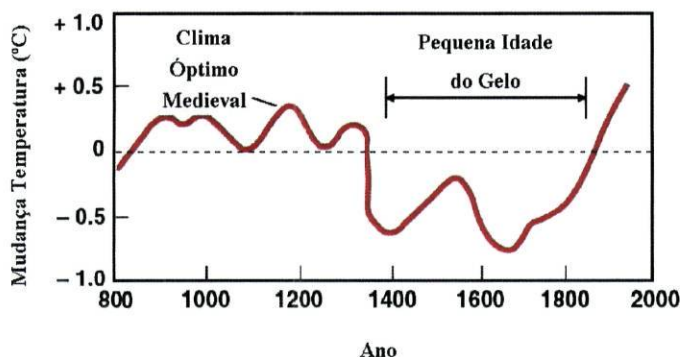


Fig. 4.2 – Pequena Idade do Gelo (adaptado de BROOKS/COLE, 2001)

Este facto correspondeu a uma descida do nível do mar que prosseguiu até pouco antes de 1850, quando o nível marinho começou a subir. A subida do nível do mar foi posterior à pequena idade do gelo, foi de 12 centímetros de 1825 até 1973 (figura 4.3).

Devido à retenção de gelo no interior dos continentes, durante a última glaciação, ao nível do mar terá descido entre 120-140 metros relativamente o nível actual, o que se traduziu num recuo da linha de costa de 30-40km ao largo do Porto (DIAS & FERREIRA, 1997). Trata-se de variações bastante rápidas que têm uma amplitude apreciável. Devido à transgressão flandriana, que se ficou a dever à fusão dos gelos da última glaciação, quase todos os litorais do globo correspondem a costas de submersão. Exceptuam-se aquelas que foram directamente submetidas às glaciações e que, sujeitas à sobrecarga dos grandes *inlandsis* sofreram um processo de afundamento durante a glaciação (glacio-isostasia), do qual estão a recuperar actualmente.

Devido à intensa dinâmica a que as áreas litorais estão sujeitas, a sua compreensão nunca estará completa sem uma referência à sua evolução no tempo.

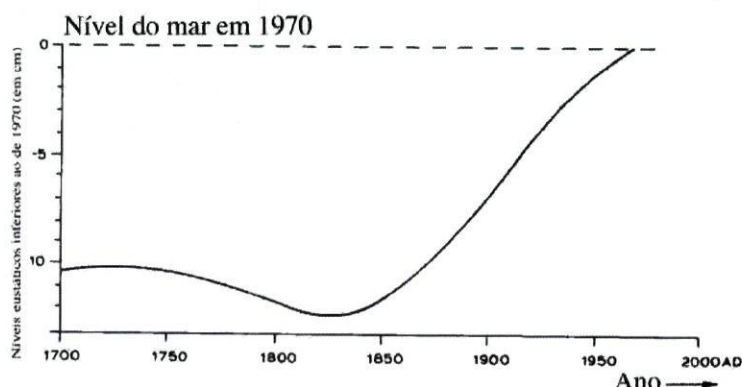


Fig.4.3 – Variações eustáticas de 1700 a 1970, segundo MORNER, 1993

Mas se os estudiosos da dinâmica do litoral têm tudo a ganhar em integrar os seus dados numa evolução histórica que os enriquece e lhes dá perspectivação indispensável, parece-me que o vários especialistas que se dedicam ao estudo da evolução do litoral também poderão dar um contributo muito válido para a compreensão da história das áreas litorais.

As fases regressivas do nível do mar parecem estar sempre ligadas a períodos de um certo arrefecimento geral (com acumulação de gelo no interior dos continentes). Esse processo fornece aos cursos de água um nível de base mais baixo, o que facilita o escoamento dos sedimentos até ao mar (figura 4.4).

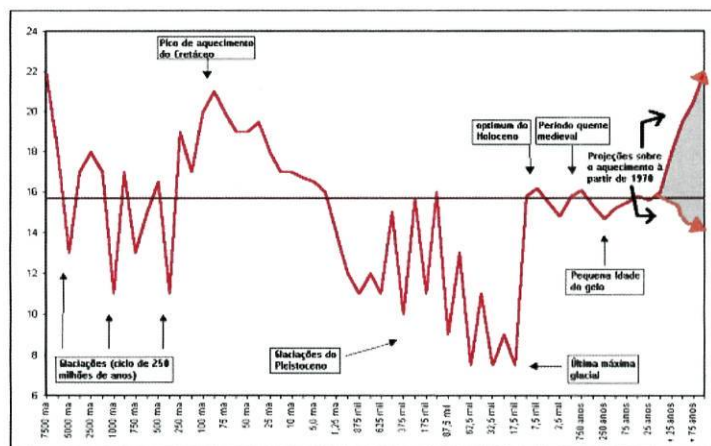


Fig.4.4 – As fases regressivas parecem estar associadas às glaciações. Adaptado de NETO (2007)

Efectivamente, nas nossas latitudes, durante os períodos frios, é incentivada a meteorização mecânica das rochas que produz uma maior quantidade de materiais detriticos (areias e materiais grosseiros). Assim sendo, os cursos de água podem transportar mais sedimentos. Estes, chegando ao litoral, podem ser distribuídos ao longo da linha de costa contribuindo para a construção de cordões litorais mais ou menos extensos. Ora, estes cordões, ao serem abandonados pelo mar, cujo nível está a sofrer uma descida ligeira, convertem-se numa fonte de areias facilmente mobilizáveis em dunas que tenderão a avançar para o interior invadindo terrenos situados a distâncias importantes em relação à linha de costa. As épocas mais frias seriam assim, favoráveis ao avanço da linha de costa e à formação de dunas.

No final do século passado verificou-se transição para a fase climática actual, ligeiramente mais quente, a qual tem vindo a ser progressivamente intensificada pela amplificação do chamado "efeito de estufa". O nível médio do mar começou a elevar-se de forma sensível. O litoral respondeu a esta modificação invertendo o comportamento, que passou a ser fortemente transgressivo. Já vimos acima a extrema importância que o clima tem, quer condicionando a variação do nível do mar, quer o fornecimento de materiais à linha de costa. “Variação climática”, “efeito de estufa”, “aquecimento global” são expressões que entraram no léxico corrente (figura 4.5).

Portugal pertence à zona de clima mediterrâneo. Todas as estações meteorológicas põem em evidência uma estação seca de Verão que, no entanto, é encurtada na sua duração pela exposição da faixa territorial à acção do Atlântico. Esta acção atlântica reflecte-se também, por sua vez, na estação invernos, amenizando-a.

Por sua vez, a cidade do Porto integra a chamada região *norte atlântica*. Esta região é fortemente húmida, caracterizada por chuvas abundantes e em que são predominantes

as influências oceânicas. A abundância de chuvas deve-se à topografia abundante da região – a barreira montanhosa da vertente atlântica origina a ascensão do ar quente e húmido, de origem atlântica, que origina fenómenos de condensação com a consequente forte precipitação atmosférica. São as chamadas *chuvas de relevo*.

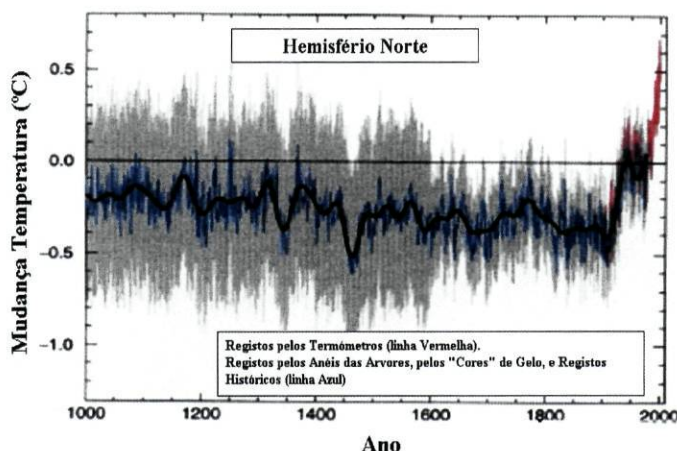


Fig. 4.5 – Temperaturas no Hemisfério Norte durante o último milénio (MANN *et al.*, 1999)

Partimos de um estudo de SILVA (2000) que procura explicar as *Origens do Porto* para caracterizarmos, genericamente, as principais características do clima da cidade do Porto. Assim segundo a tipologia de KÖPPEN (1932), a cidade do Porto apresenta temperaturas médias compreendidas entre os 3°C e os 22°C, recebendo o mês mais seco menos de um terço da precipitação do mês mais húmido. Outro dos elementos característicos da cidade do Porto é a frequência de nevoeiros, cuja origem deste fenómeno é diversa, no entanto, pode-se explicar a sua frequência pela proximidade do Oceano Atlântico e do rio Douro, ambos criadores de condições para a sua ocorrência.

Quanto ao rumo dos ventos e sua distribuição mensal, são visíveis variações ao longo do ano. Assim, de Abril a Agosto, é evidente a importância dos quadrantes marítimos WNW e NW. Nos restantes meses nota-se a predominância dos meses de quadrante SE. Como factores explicativos destas situações, poder-se-á mencionar a influência geral da circulação atmosférica, a orientação do vale do Douro e o efeito da barreira da Serra de Valongo de direcção aproximada NW-SE.

5. MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO DO GRANITO DO FAROL DE S. MIGUEL-O-ANJO

5.1 Introdução

Partindo do princípio de que as obras de manutenção e conservação executadas a tempo asseguram longa vida aos monumentos, evitando que os danos se agravem, recomenda-se o maior cuidado possível na vigilância contínua dos imóveis para se tomarem medidas de carácter preventivo, também com a finalidade de evitar intervenções de maior amplitude. Uma exigência fundamental do restauro é aquela de respeitar e salvaguardar a autenticidade dos elementos constitutivos da obra. Esse princípio deve sempre guiar e condicionar as escolhas operacionais.

Os trabalhos de limpeza de um material pétreo consistem numa série de operações destinadas a removerem as substâncias estranhas presentes na sua superfície, patogénicas e geradoras de degradação; para serem executados, estão disponíveis métodos físicos e químicos que devem ser empregues com diferentes ordem e intensidade, em função do tipo de substância que se pretende retirar, da natureza do elemento pétreo e, sobretudo, do estado de conservação do objecto que vai ser limpo.

Por estes motivos, a limpeza torna-se numa operação complexa e delicada que necessita de uma atenta análise do quadro patológico geral, de um aprofundado conhecimento da degradação específica e, até, da verdadeira consistência física da pedra.

A limpeza dos materiais porosos deve, em primeiro lugar, remover da sua superfície todas as substâncias patogénicas, respeitando a patina natural (onde ela ainda existir), afastando os produtos de reacção (crostas negras, filmes negros, manchas diversas) que estejam em condições de prosseguirem a acção de degradação.

Os trabalhos de limpeza destinam-se, além de uma finalidade estética, a eliminar tudo quanto seja prejudicial (sais solúveis, incrustações, microorganismos, vegetação parasita, dejectos de aves, poeiras, poluentes atmosféricos), respeitando a patina natural.

A aplicação dos tratamentos de conservação (técnicas de consolidação e/ou protecção) deve ser precedida de ensaios de laboratório para que a sua eficácia, durabilidade e adequação ao caso a que se destinam sejam devidamente estabelecidas, ou realizar testes *in-situ* (técnicas de limpeza). As técnicas de reparação deverão ser estudadas para os elementos constituintes da alvenaria: parede (comportamento mecânico da alvenaria), blocos de pedra (individuais), juntas e revestimento (se existir). As técnicas a aplicar dependem do conhecimento das características da pedra e dos mecanismos que originaram o seu estado de alteração.

As acções de manutenção periódica minimizam o aparecimento de anomalias e o seu agravamento durante a vida útil das construções.

5.2 Eliminação de agentes causadores de degradação da pedra

As técnicas de limpeza recorrem a métodos físico-químicos que devem ser usados gradualmente, com intensidades diversas consoante o tipo de substância que se pretende eliminar ou remover.

Os tipos de depósitos classificam-se globalmente de acordo com as seguintes características: incoerentes, não apresentando qualquer tipo de coesão ou de reacção com o material de suporte; compostos, apresentando substâncias que tendem a solidarizarem com a superfície com uma ligação simplesmente mecânica, sem alterar a natureza química do material do suporte; fortemente coesos, resultantes de reacções químicas entre as substâncias externas e o material do suporte.

Os métodos de limpeza mais aconselhados e que são largamente preconizados para monumentos como o Farol de S. Miguel-o-Anjo são: mecânicos suaves: limpeza mecânica, aspiradores, vassouras e escovas de fibras vegetais; químicos: biocidas, pastas de argilas absorventes, pasta gelatinosas dissolventes, compressas biológicas, produtos químicos; água nebulizada e água atomizada.

A finalidade da limpeza é a remoção da sujidade, a qual é frequentemente origem de degradação na pedra a longo prazo, não se provocando ou provocando-se o mínimo possível de estragos nesta. Isto pode ser difícil de se conseguir por causa da ligação íntima entre a pedra e a sua sujidade, já que a sujidade pode estar profundamente embebida nas partículas da superfície. Para se removerem os depósitos de materiais incoerentes bastam os sistemas mecânicos suaves: aspiradores, vassouras e escovas de fibras vegetais (menos agressivas que as de materiais sintéticos), ligeiros sopros de ar comprimido, etc.; estes métodos podem ser integrados com o emprego de bisturis, de pequenas espátulas e de escovas menores em nylon. Para se removerem os filmes negros, os sistemas variam, de caso em caso, conforme a natureza específica dessa alteração.

Para se proceder a uma correcta selecção do sistema de limpeza mais adequado a cada caso individual, devem-se seguir os critérios que se enumeram abaixo: a relevância histórica, artística e cultural do objecto; a estrutura petrográfica e mineralógica da pedra; o estado de degradação da pedra; em muitos casos pode estar de tal forma avançado que exija, antes de se proceder à limpeza, uma adequada pré-consolidação reversível das suas partes superficiais; a natureza das crostas ou dos depósitos que se devem remover; a forma e a configuração da superfície a ser tratada (paramento liso, baixo relevo, etc.); os tempos de execução; e a disponibilidade de executantes especializados.

5.2.1 Eliminação da colonização biológica

O arranque dos exemplares de plantas superiores mais fortemente enraizados nas juntas ou fendas pode danificar as pedras adjacentes. As plantas superiores deverão ser tratadas com aplicação de um biocida sistémico/ herbicidas (clorotriazina – actua por absorção radicular; metoxitriazina – actua por absorção radicular e folicular) para eliminar as espécies presentes que, só posteriormente, deverão ser removidas, segundo BEGONHA (2003a, b, c e d).

Os líquenes e os microorganismos ainda que em pequeno número devem ser eliminados através de um tratamento com biocida apropriado à base de sais de amónio quaternário. Nas áreas mais intensamente colonizadas, poderá ser necessário aumentar o número de aplicações, podendo ser executadas a pincel ou com aspersor e seguindo-se criteriosamente as instruções do fabricante e as recomendações do mesmo relativamente à protecção a ter com o técnico aplicador e outras pessoas próximas do local. Durante a aplicação e período de acção do produto, as áreas tratadas devem ser protegidas da chuva, segundo BEGONHA (2003 a, b, c e d).

Previamente à remoção do material biológico, deverá proceder-se à confirmação de que todas as plantas estão mortas. A raspagem dos líquenes vivos evidencia uma componente esverdeada subjacente, segundo BEGONHA (2003 a, b, c e d). Quando tal suceder, será necessário efectuar nova aplicação do biocida. Após um período não inferior a quatro semanas de actuação do biocida (com confirmação de que todos os exemplares estão mortos), a colonização deverá ser removida com escovas macias de piaçaba ou de nylon e, eventualmente, com o auxílio de pequenas quantidades de água, de preferência pelo sistema de água nebulizada e atomizada (a água é vaporizada a baixa pressão). O sistema de água nebulizada e atomizada tem a vantagem de ser um sistema eficaz, não abrasivo, não poluente, e é particularmente indicado para limpeza de superfícies delicadas. A limpeza deverá ser realizada de modo a que o edifício exiba uma patina o mais homogénea possível.

Mesmo os biocidas mais eficazes não impedem a recolonização biológica a médio ou longo prazo, devendo-se por isso proceder à sua reaplicação com certa regularidade, sobretudo na fachada Nascente (Este) onde as condições de mais humidade favorecem o crescimento de seres vivos.

5.2.2 Consolidação das áreas mais afectadas da pedra

Os objectivos da consolidação são o aumento da coesão da pedra, o aumento da aderência entre zonas degradadas essencialmente na fachada Nascente (Este), e o aumento da resistência mecânica da pedra consolidada.

Segundo BEGONHA (2003a, b, c e d), é fundamental a penetração do consolidante, mas esta não deve criar descontinuidades entre camadas externas e internas. Esta

penetração depende da porosidade da estrutura a ser tratada, das propriedades químicas e físico-químicas do consolidante, da composição química do solvente, da densidade, viscosidade e tensão superficial da solução, das modalidades de aplicação da solução, do tempo de contacto entre a pedra e a solução, e das condições ambientais durante o tratamento. Como resultado da consolidação também pode acontecer uma diminuição da porosidade. Devem ser preferidas consolidações que reduzam parcialmente a porosidade do material e que reduzam a penetração da água, mantendo uma boa permeabilidade ao vapor.

A consolidação não deve produzir substâncias agressivas para a pedra e a sua reversibilidade deve ser considerada em sentido relativo; é preferível usar-se um produto reversível mesmo que depois o processo de extracção não permita a sua total remoção. Em todos os casos, o consolidante deve permitir tratamentos futuros.

O consolidante deve ser aplicado até recusa aparente, de modo a conseguir-se uma profundidade de penetração o maior possível, seguindo-se as instruções do fabricante. As pedras deverão estar limpas e secas, não podendo o produto ser aplicado em superfícies molhadas. Após a aplicação, o produto tem um tempo de cura de pelo menos três semanas, pelo que as superfícies consolidadas deverão continuar protegidas da chuva durante este intervalo de tempo (BEGONHA 2003a, b, c e d).

5.2.3 Sistemas dissuasores de gaivotas/pombos

Estes sistemas têm como objectivo evitar o acesso ou permanência dos pombos (*Columbia livia*) e gaivotas (*Larus fuscus graellsii*) nas superfícies, protegendo o Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro (figura 5.1).

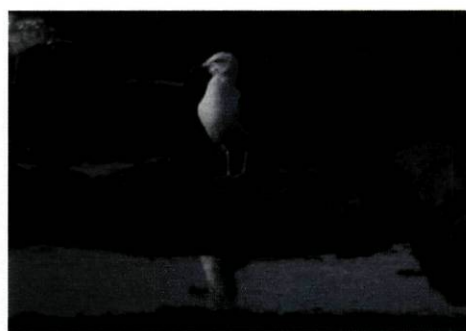


Fig. 5.1 – Gaivotas cujo nome científico é *Larus fuscus graellsii* na Foz do Douro

A aglomeração de fezes de pombos/gaivotas no Farol de S. Miguel-o-Anjo e nos edifícios adjacentes é considerável, e a tarefa de limpeza fica dispendiosa. São muitos os problemas encontrados pela aglomeração de fezes, penas e restos de ninhos, que levam a entupimentos de sistema de drenagem de águas de chuva.

Os tipos de sistemas mais utilizados são os seguintes: sistema com picos em aço inoxidável, fixação através de pontos de cola de pedra acrílica de 2 componentes;

sistema eléctrico (para colónias persistentes); redes resistentes aos UV e fixadores em aço inoxidável.

5.2.4 Tratamento das juntas

Todas as juntas que se encontrem abertas ou em desagregação deverão ser libertas de todos os materiais estranhos e prejudiciais à pedra, sais solúveis, incrustações, materiais orgânicos, ervas, entre outros (figura 5.2a e 5.2b).

Segundo HENRIQUES (2004), o tratamento das juntas consiste em três fases distintas: Remoção dos materiais não funcionais; Enchimento parcial dos vazios existentes; Refechamento superficial.

Devem ser efectuadas análises cuidadas destinadas ao estudo da composição físico-química das argamassas para determinar a sua natureza, proveniência, dosagem e granulometria.



a)



b)

Fig.5.2 – Juntas sem argamassas do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro: Fachada lateral Sul (a) e fachada lateral Nascente (b)

5.2.4.1 Remoção dos materiais não funcionais

No Farol de S. Miguel-o-Anjo existem algumas juntas entre blocos que se encontram preenchidas com argamassas de cimento, reconhecíveis pela sua cor característica, cuja remoção se afigura difícil sem causar danos nas pedras adjacentes (figura 5.3a). Nesse contexto, sempre que as argamassas se encontram em boas condições e em locais não visíveis de perto é melhor não remover e deixá-las sem intervenção. Quando estão situadas em zonas visíveis, a colocação de uma simples velatura não assegura boas condições de cobertura, pelo que se deve remover superficialmente as argamassas existentes, de forma a possibilitar a aplicação de um fino estrato de argamassa nova. Nos locais em que as argamassas de cimento se sobrepõem à pedra, criando manchas dissonantes, deve proceder-se à sua remoção porque estão contribuir para a degradação por libertação de sais, caso apresentem elevadas concentrações de ligantes ricos em iões, como é o caso do cimento nas zonas visíveis (figura 5.3b).



a)



b)

Fig. 5.3 – Fachada lateral Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo. a) Juntas entre blocos que se encontram preenchidas com argamassas de cimento; b) Argamassas de cimento que se sobrepõem à pedra.

5.2.4.2 Enchimento parcial dos vazios existentes

As principais características para as argamassas de exterior de enchimento das juntas abertas (evitando ou diminuindo a velocidade com que se processa a desagregação do granito) deverão ser as seguintes, segundo HENRIQUES (2004): a absorção capilar de água deve ser a menor possível, quer em termos de coeficiente de capilaridade, quer no que se refere ao valor da quantidade total de água absorvida; a água que inevitavelmente se infiltra na argamassa deve poder evaporar, pelo que a permeabilidade ao vapor de água é uma característica fundamental para o seu desempenho; as argamassas devem libertar o menor teor possível de sais solúveis; a resistência a ciclos de gelo/degelo; a evaporação de água também constitui um factor importante para a preservação das argamassas, particularmente quando se consideram os efeitos do gelo e do transporte e cristalização dos sais solúveis; as argamassas devem endurecer ou fazer presa num período de tempo suficientemente curto, de modo a prevenir possíveis deteriorações devido a resistências mecânicas iniciais insuficientes.

5.2.4.3 Refechamento superficial

O primeiro requisito de argamassas para refechamento de juntas é provavelmente a resistência mecânica nas suas várias formas. De facto, deve ter-se presente que o objectivo de uma junta é de natureza estrutural. As juntas existem para distribuir as tensões entre elementos da alvenaria, aumentando o atrito que previne os elementos de se movimentarem da sua posição. Assim, desde logo uma argamassa para refechamento de juntas deve possuir resistência à compressão suficiente para suportar as tensões que existem ou possam vir a ser geradas na alvenaria. Simultaneamente, estas argamassas devem ser ligeiramente expansivas, de modo a criarem uma boa base para a distribuição de tensões (uma vez que qualquer redução da área de contacto entre os elementos da alvenaria e a argamassa da junta vai, inevitavelmente, aumentar as tensões).

Nas argamassas para refechamento de juntas o fenómeno da fendilhação pode não ser especialmente relevante. Por outro lado, a utilização de ligantes aéreos, tais como a cal hidratada – é de algum modo condicionada pelo facto de poderem não atingir uma cura adequada, devido à dificuldade de acesso do dióxido de carbono (CO_2) necessário para a carbonatação da cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$), em virtude da profundidade do preenchimento da junta (figura 5.4).

Dado que a principal preocupação com argamassas para refechamento de juntas é possuírem uma boa resistência mecânica, então a utilização de ligantes hidráulicos ou de adições que possam induzir o desenvolvimento de hidraulicidade é geralmente considerada. Mas, neste caso, formam-se geralmente aluminatos e silicatos, que potencialmente reduzem a resistência à acção de alguns sais solúveis, em particular dos sulfatos.



Fig. 5.4 – Juntas profundas sem argamassas na fachada Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro – Porto.

As argamassas para refechamento de juntas devem ser consideradas não só do ponto de vista estrutural, mas também tendo em conta o comportamento face à capilaridade e o modo como resistem à acção dos sais solúveis. Esta categoria pode ser dividida em duas, uma das quais atribuindo particular atenção às características hídricas (capilaridade, permeabilidade ao vapor de água) e resistência aos sais solúveis, enquanto a outra se aproxima dos requisitos das caldas em termos das características de injeção e do tempo e condições de cura.

As argamassas para as camadas exteriores devem cumprir os requisitos seguintes: boa aderência; baixa absorção capilar de água; elevada permeabilidade ao vapor de água; boa resistência aos sais solúveis; boa resistência a ciclos de gelo/degelo; reduzida libertação de sais solúveis; alguma dureza superficial; cor e textura compatível com os objectivos definidos na intervenção.

Segundo VEIGA *et al.* (2001) as argamassas com base em cal aérea, com cal aérea como único ligante, ou em mistura com teores reduzidos de cimento são as mais adequadas para revestimentos de paredes antigas, por outro lado o estudo cuidadoso das misturas de areias mais apropriadas surge como essencial para melhorar o desempenho de argamassas com base em cal.

5.2.5 Colagens e injeção de fissuras

Nas colagens (fixação de fragmentos destacados) e preenchimento de fissuras (figura 5.5), utilizam-se pastas apropriadas e colas, podendo ser adicionado um pigmento para obter a cor da pedra; as pastas são normalmente constituídas por um ligante e um pó adequado; as resinas epóxicas têm sido muito utilizadas pelo seu poder de colagem; no entanto, são susceptíveis de amarelecer e enfraquecer por acção da luz e

de alguns agentes atmosféricos; a sua utilização é aconselhada para tratamento de zonas em profundidade, utilizando-se posteriormente resinas acrílicas para o acabamento superficial; nos casos de vazios resultantes de destacamentos significativos, é usual a injeção de argamassas hidráulicas fluidas com baixo teor de sais solúveis; por vezes, utiliza-se apenas argamassa de cal. Os cimentos são totalmente desaconselhados por serem ricos em sulfatos e sais alcalinos, favorecendo a formação de cristais, segundo HENRIQUES (2004).



Fig. 5.5 – Fissuras nas pedras de granito Fachada lateral Nascente (Este) do Farol de S. Miguel-o-Anjo.

A consolidação das pedras ou de outros materiais deverá ser tentada experimentalmente. Deverão ser tomadas todas as precauções para evitar que a situação se agrave; do mesmo modo, todas as intervenções deverão ser postas em prática para eliminar as causas dos danos. Por exemplo, logo que se notem pedras fendidas por grampos ou pernos de ferro que com a humidade se corroem e aumentam de volume, convém desmontar a parte afectada e substituir o ferro por bronze ou cobre; ou, melhor ainda, por aço inoxidável, que apresenta a vantagem de não manchar a pedra, segundo HENRIQUES (2004).

5.3 Conclusões

É imprescindível, para tratar um problema de conservação ou de restauro, que existam e sejam exigidos estudos de carácter multidisciplinar. O primeiro passo para a conservação ou restauro deve ser a eliminação ou minimização das causas das alterações das rochas. A escolha da aplicação de qualquer tipo de procedimento deve ser feita apenas após os ensaios laboratoriais necessários, a fim de determinar a sua eficácia, durabilidade e adequação.

O “*Grupo de Trabalho de Tratamentos de Pedra*” propôs em 1971, na Reunião de Bolonha, a classificação dos tratamentos a aplicar às pedras, a fim de conservá-las e restaurá-las, a partir de três grupos: limpeza, consolidação e protecção.

A limpeza permite eliminar tudo o que seja prejudicial à pedra, além de permitir melhorar o seu aspecto estético e visual. Através da limpeza podemos eliminar os sais solúveis, as incrustações, os microorganismos, a vegetação parasita, os excrementos das aves, as poeiras e as partículas de poluição atmosférica. Há que salvaguardar a

superfície primitiva da pedra, tentando preservar ao máximo o seu aspecto artístico original. A limpeza das superfícies constitui uma operação muito complexa e delicada; exige uma análise atenta do quadro patológico geral, um profundo conhecimento da natureza da degradação e do estado de consistência física. Deverão ser realizados ensaios prévios para testar a eficácia da técnica escolhida.

Se a pedra estiver em estado avançado de deterioração, a limpeza não é o método mais correcto, a ser aplicado inicialmente. Neste ponto, será necessário proceder-se a uma consolidação, que logicamente vai condicionar o método de limpeza a aplicar. As intervenções em alvenaria de pedra podem incluir: limpezas, consolidações, protecções, reparações, substituições (elementos de pedra, ferros corroídos) e reforços (às acções gravíticas e sísmicas).

As técnicas de reparação e reforço são utilizadas quando se pretende restabelecer o nível inicial de desempenho da estrutura e aumentar a capacidade resistente da estrutura, respectivamente.

A melhor e mais eficaz forma de combater os agentes agressores é, sem dúvida, eliminar a sua presença. Acresce ainda referir que nenhum tratamento é indefinidamente eficaz, pelo que só através de uma monitorização e manutenção continuada se poderá conservar com sucesso o Farol de S. Miguel-o-Anjo, garantindo uma efectiva gestão do património. Nenhuma intervenção de conservação fica completa sem a definição precisa de um plano de manutenção regular, tal como preconiza o artigo 4º da Carta de Veneza.

Os Monumentos envelhecem, e desse modo, devemos sempre ter cuidados para que eles não sofram com as alterações ambientais, com vandalismos e principalmente com o esquecimento. A recuperação e reabilitação do Património Antigo são temas muito importantes, não só pela importância histórica e cultural, mas também pela importância dos legados deixados pelos nossos antepassados, fundamentais para a compreensão e para a própria identificação de um povo. Qualquer intervenção deverá respeitar os seguintes princípios: ser reversível, não prejudicar uma intervenção futura, não alterar o aspecto visual, ser documentada, manter as evidências históricas, intervenção mínima, estabilidade aos agentes químicos. É importante ressaltar que a conservação preventiva dos Monumentos é fundamental para que a mesma não chegue a sofrer intervenções de restauro.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na sequência da exposição detalhada do trabalho que consta dos capítulos anteriores, apresentam-se neste ponto as principais conclusões que dele foi possível extrair, a seguir expostas.

Os estudos mineralógicos e químicos realizados sobre as deteriorações da pedra até uma altura de 2,50 metros no Farol de S. Miguel-o-Anjo na Foz do Douro, mostraram que estas apresentavam diferentes graus de meteorização herdados da pedreira aquando a construção e da presença ou ausência de argamassas que assume um papel importante na protecção das alvenarias contra os agentes atmosféricos.

A cartografia das deteriorações mostrou que a desagregação granular e os filmes negros constituem as degradações mais frequentes no Farol de S. Miguel-o-Anjo. As pedras que exibem desagregação granular de maior intensidade localizam-se sobretudo nas zonas mais baixas das fachadas, estando associada à ascensão capilar de soluções salinas, também à ausência de argamassas, e ao rumo dos ventos e à sua distribuição mensal ao longo do ano. A desagregação granular na fachada Nascente é condicionada pela existência da escadaria interior do Farol de S. Miguel-o-Anjo, que interfere com a espessura das pedras de granito (são menos espessas), com a quase ausência de argamassas, assim como, com o rumo dos ventos de Setembro a Março/Abril que são predominantemente do quadrante Sudeste.

Relativamente à alteração cromática verificou-se na análise da espectroscopia Raman que as capas de óxidos de ferro de lixiviação sobre o quartzo dos granitos é superficial, e verificou-se também pela análise do espectro das amostras de granito de cor “bege amarelado” que não existe alteração da albite. O Farol de S. Miguel-o-Anjo não apresenta modificações cromáticas, logo nestes granitos ainda não ocorreu a alteração-modificação cromática da albite, segundo a análise da espectroscopia Raman.

Os filmes negros recobrem sobretudo zonas expostas das fachadas não sujeitas a forte escuridão.

As crostas negras estavam associada a pormenores arquitectónicos salientado relativamente ao plano da fachada, em área que permanece húmida durante períodos de tempo considerável, mas protegida da acção da chuva, não estando submetidas a lixiviação.

As plaquetas/lascas têm reduzido expressão no Farol de S. Miguel-o-Anjo, localizam-se, de um modo geral, imediatamente abaixo da desagregação granular, estando relacionadas com a cristalização e concentração de gesso no interior das pedras e segundo planos paralelos às suas superfícies exteriores. As pedras afectadas por plaquetas/lascas exibem quer zonas empoladas que correspondem a áreas onde as plaquetas estão

destacadas, mas que ainda não caíram, quer zonas semelhantes a pequenas crateras onde as plaquetas/lascas já caíram.

A presença de líquenes amarelos indica que a poluição atmosférica existente próximo da localização do Farol de S. Miguel-o-Anjo é pouco elevada, já que é factor crucial à sobrevivência dos líquenes, já que estes se alimentam higroscopicamente, fixam os elementos químicos presentes, principalmente o azoto. Os líquenes são os inspectores da qualidade do ar, os líquenes resistem bem às variações de temperatura e de humidade e apresentam grande sensibilidade face às variações de poluição do ar. Aparecem líquenes crustáceos de cor branca ou de talo ligeiramente fissurado aureolado, líquenes foliáceos de talo esverdeado e líquenes foliáceos de talo amarelos. Os líquenes têm alta afinidade com o ambiente em que vivem, indicando desde a humidade do ar, acidez do substrato rochoso e pH, além de demonstrarem alta sensibilidade a inúmeros tipos de poluentes, tais como dióxido de enxofre, fluoretos, ozono e óxidos de azoto. Por isso, são bioindicadores de ambientes e da qualidade do ar e, pela capacidade de absorver e reter contaminantes atmosféricos nas suas células, funcionam também como biomonitorios. A colonização biológica observa-se na área em estudo, quer na fachada Sul, quer na fachada Nascente, particularmente a existência de plantas superiores, e também de patinas resultantes das colónias de algas e as cianobactérias apresentando uma coloração verde brilhante. A biodeterioração da pedra é fraca.

A proximidade do Atlântico e da Foz do rio Douro repercute-se na elevada precipitação média anual, na composição essencialmente cloreto-sódica das águas das chuvas, na elevada humidade relativa do ar com a formação de nevoeiros frequentes e na presença de aerossóis de origem marinha.

A deterioração dos monumentos de pedra deriva, principalmente hoje em dia, da poluição do ar que degrada, por vezes irreversivelmente, as pedras. Este problema tem uma importância fulcral nos monumentos de pedra que estiveram sujeitos continuamente durante muitos anos aos agentes atmosféricos. Como principais poluentes temos o dióxido e trióxido de enxofre, o dióxido de carbono, os óxidos de azoto, os cloretos e o ácido clorídrico, os fluoretos e o ácido fluorídrico, o ácido sulfúrico, o ozono, a amónia e as poeiras. A presença destas partículas no ar contribui para o decaimento acentuado das características originais da pedra em monumentos. O controlo das emissões dos gases poluentes é o meio mais eficaz de proteger e de prevenir a degradação dos monumentos de pedra.

O estabelecimento de um inventário relacional do património construído com a jazida de origem da sua pedra é importante ser efectuado. Esta situação favorecerá o restauro e conservação por substituição directa de certos elementos de pedra, como ainda permitirá efectuar prioridades, actuando ou fazendo estudos sobre alterabilidade de vários tipos de rocha em ambientes naturais e outros artificiais em laboratório que simulem em ritmo acelerado certos cenários ambientais da actualidade, de modo a efectuar melhores previsões de manutenções/conservações do património construído.

REFERÊNCIAS

A

- ACKER, J.G., BRICKER, O.P., 1992 - The influence of pH on biotitic dissolution and alteration kinetics at low temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 56, pp. 3073-3092.
- AGENDA 21 LOCAL PARA A FREGUESIA DE MINDELO (Vila do Conde), 2004 - Relatório de Sustentabilidade - EEP - 09.04 - 03/17 - IDAD - Instituto do Ambiente e Desenvolvimento
- AIRES-BARROS, L., 1991 - Alteração e alterabilidade das rochas. Universidade Técnica de Lisboa, Inst. Nac. de Investigação Científica, Lisboa, 384 pp.
- AIRES-BARROS, L., 1996 - Monitoring of some meteorological variables related with hygroscopic products occurring at monuments of the Mediterranean basin In *Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments-Bari 1996*, (ed. F. Zezza), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report N° 4, pp. 57-73.
- AIRES-BARROS, L., 2001 - As rochas dos monumentos portugueses. Tipologias e patologias. Instituto Português do Património Arquitectónico, Ministério da Cultura, Lisboa, vol. I e II, 535 pp.
- AIRES-BARROS, L., BASTO, M. J., 1993 - As partículas sólidas da atmosfera envolvente dos Jerónimos e a minero-química das suas crostas de alteração. In *Proceedings IX Semana de Geoquímica e II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa*, (eds. Fernando Noronha, M. Marques, P. Nogueira), Porto 1993, pp. 515-518.
- AIRES-BARROS, L., BASTO, M. J., 1997 - A mineralogia na conservação e restauro dos monumentos: o caso do portal da Igreja de Santa Cruz em Coimbra. *Materiais* 97, vol. 2, Marinha Grande, pp. 307-314.
- AIRES-BARROS, L., BASTO, M. J., 1998 - Estudo comparativo de crostas negras "fósseis" e actuais. Os casos do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha e da Igreja de Santa Cruz, em Coimbra. *Com. IGM*, tomo 84, fase. 2, Lisboa, 1998, pp. F166-F169.
- AIRES-BARROS, L., BASTO, M. J., PEREIRA, A., 1995 - Os minerais das patologias do portal de Santa Cruz em Coimbra. In *IV Congresso Nacional de Geologia, Resumos alargados, Memórias n° 4*, (coord. F. Sodré Borges, M. M. Marques), Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, 1995, pp. 151-154.
- AIRES-BARROS, L., MAURÍCIO, A., 1992 - Topoclimatic characterization of south down gallery in the Jeronimos Monastery cloister, Lisboa. In *Proceedings 7 th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, vol. 1, Lisboa 1992, LNEC, (eds. J. Delgado Rodrigues, Fernando Henriques, F. Teimo Jeremias), pp 335-344.
- AIRES-BARROS, L., MAURÍCIO, A., 1995 - Forecast of spacio-temporal probability of salt efflorescence occurrences on monuments stones. In *Proceedings IV Congresso Nacional de Geologia-Porto 1995*, (coord. F. Sodré Borges e M.M. Marques), Universidade do Porto -Faculdade de Ciências - Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Memórias, N° 4, pp. 161-167.
- AIRES-BARROS, L., MAURÍCIO, A., 1996 - Chronology, probability estimations and salt efflorescence occurrences forecasts on monumental building stones surfaces. In *Proceedings 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone-Berlin 1996*, (ed. Josef Riederer), vol. 1, Berlin, pp. 497-511.
- ALCOFORADO M J., 1999. Variações climáticas do passado: chave para o entendimento do presente? Exemplo referente a Portugal (1675-1715). *Territorium*, 6: 19-30.
- ALCOFORADO M J, NUNES M F, GARCIA J C., 1997. Climat et société à Lisbonne avant la mise en place institutionnelle des observations météorologiques. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 10: 75-83.

- ALCOFORADO M J, NUNES F, GARCIA J C, TABORDA J P., 2000. Temperature and precipitation reconstruction in southern Portugal during the late Maunder Minimum (AD 1675-1715). *The Holocene*, 10 (3): 333-340.
- ALMEIDA, A., 1994 – Geoquímica, petrogénese e potencialidades metalogénicas dos granitos peraluminosos de duas micas do Complexo de Cabeceiras de Basto - Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Porto, 305 pp.
- ALMEIDA, A., 2000 – Caracterização petrográfica do granito do Mosteiro de S. Miguel de Refojos em Cabeceiras de Basto. Relatório interno do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 4 pp.
- ALMEIDA, A., 2001 - Geochemical and geochronological characterization of the syntectonic two-mica granite of Porto (NW Portugal). In *Proceedings III Congreso Ibérico de Geoquímica e VIII Congreso de Geoquímica de Espana*, (eds. M. Lago, E. Arranz, C. Galé), Zaragoza, pp. 311-315.
- ALMEIDA, A.; BEGONHA, A.; VIEIRA, N.; RAMOS, F., 2003 – Geologia no Verão. O granito na Cidade. Porto: MCT e Departamento de Geologia da F.C.U.P., s.d.
- ALMEIDA, A., 2006. Geology and the urban landscape: the granite of Oporto. *European Geologist*, 21: 4-8
- ALVERSON, K. D., BRADLEY, R. S. and PEDERSON, T. F., 2003 (eds) - *Palaeoclimate, global change and the future* Springer, Berlin.
- ALVES, C, 1997 – Estudo da deterioração de materiais graníticos aplicados em monumentos de Braga (Norte de Portugal). Implicações na conservação do Património Construído. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, 291pp.
- ALVES, C, 2000 – Estudo da deterioração de pedras ígneas aplicadas no património construído -considerações sobre algumas questões metodológicas e sobre o potencial interesse deste estudo. In *Geonovas*, nº14, pp.39 - 46.
- ALVES, C, SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1993 - Sais solúveis presentes em monumentos graníticos de Braga. In *Proceedings IX Semana de Geoquímica e II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa - Porto, 1993* (ed. F. Noronha, M. Marques e P. Nogueira), Porto, pp. 525-529.
- ALVES, C, SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1994 - Acção deteriorante da cristalização de sais em monumentos graníticos (um exemplo em Braga, Portugal). In *Proceedings Scientific Meeting -Granitic Materials and Historical Monuments-Braga 1994*, Braga.
- ALVES, C, SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1995 - Transferências de soluções e deterioração de materiais graníticos aplicados em monumentos de Braga (Portugal). I Congresso Internacional de Pedra natural, Lisboa, pp. 281-292.
- ALVES, C, SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1996 - Salt systems on granitic monuments (Braga - NW Portugal. In *Proceedings of the European Commission Workshop Degradation and Conservation of Granitic Rocks in Monuments-Santiago de Compostela 1994*, (eds. MA. Vicente, J. Delgado Rodrigues e J. Acevedo), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report N°. 5, pp. 109-114.
- ALVES, C, SEQUEIRA BRAGA, M. A., HAMMECKER, C, 1996 - Water transfer and decay of granitic stones in monuments. *CR. Acad. Sei. Paris*, T.323, Série II a, pp.397-402.
- AMARAL, A. & CORREIA, C., 1998- “Química”, 12º ano de escolaridade, Porto Editora.
- AMOROSO, G.G., FASSINA, V., 1983 - *Stone decay and Conservation* - Elsevier, Materials Science Monographs, 11, 453 pp.
- APPLETON, J., 2002 - Estudos de diagnóstico em edifícios. Da experiência à ciência. In *Livro de actas do Seminário A Intervenção no Património; Práticas de Conservação e Reabilitação*. FEUP/DGMEN, pp. 29-34.
- ARAÚJO, M. A., 1990 – “Caracterização Geológica e Geomorfológica da plataforma litoral da região do Porto” – Actas do 1º Simpósio sobre a protecção e revalorização da faixa cos-teira do Minho ao Liz, Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia, Porto, p. 132-139.

- ARAÚJO, M. A., 1990 – “O litoral e os recursos hídricos do norte de Portugal: notícia de duas reuniões recentes” – Vol. VI da Revista da Faculdade de Letras - Geografia, 1ª Série, Porto, p. 291-296.
- ARAÚJO, M. A., 1991 - Evolução geomorfológica da plataforma litoral da região do Porto - Edição da autora, Porto, FLUP, 534 p., c/ anexos (87 p.) e 3 mapas fora do texto.
- ARAÚJO, M. A., 1992 - Alguns aspectos geomorfológicos do litoral de região do Porto - Livro guia das visitas de estudo realizadas na área metropolitana do Porto no âmbito do VI Colóquio Ibérico de Geografia, Instituto de Geografia da FLUP, Porto, 1992, p. 1-15.
- ARAÚJO, M. A., 1991 – “A variação climática durante o Würm na plataforma litoral da região do Porto” – Actas do Seminário “A zona costeira e os problemas ambientais” organizado pela Comissão Instaladora da Associação EUROCOAST, em Setembro de 1991, em Aveiro, p. 43-52
- ARAÚJO, M. A., 1993 – “Fácies fluvial versus marinho nos depósitos da plataforma litoral da região do Porto” - Actas da III reunião do Quaternário Ibérico, Coimbra, 27 de Setembro a 1 de Outubro de 1993, p. 225-235
- ARAÚJO, M. A., 1994 – “Geomorphological Evolution of Littoral Platform from Porto Region (North of Portugal) - extended abstract. - Subcomission on Mediterranean and Black Sea Shorelines”, Newsletter n. 16, INQUA, p. 19-22.
- ARAÚJO, M. A., 1995 – “Os fácies dos depósitos würmianos e holocénicos e as variações climáticas correlativas na plataforma litoral da região do Porto” - Actas do VI Colóquio Ibérico de Geografia, Publicações da Universidade do Porto, p. 783-793.
- ARAÚJO, M. A., 1995 – “Paleoambientes fini-terciários e quaternários no litoral da região do Porto – Dinamica y Evolución de Medios Cuaternarios” - Actas do Simpósio Internacional sobre Paleoambiente Cuaternario na Península Ibérica, Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, p. 359-373.
- ARAÚJO, M. A., 1997 – “A plataforma litoral da região do Porto: Dados adquiridos e perplexidades” – Estudos do Quaternário, nº 1, APEQ, Lisboa, p. 3-12
- ARAÚJO, M. A., 1997 – The littoral platform from NW Portugal: some evidences of neotectonics, Abstract from “Late Quaternary Coastal Tectonics” meeting organizada pela Comissão de Neotectónica da INQUA e realizada na London Geological Society (Londres)
- ARAÚJO, M. A., 2000 – “A evolução do litoral em tempos históricos: a contribuição da Geografia Física”. Resumos do Seminário “O litoral em perspectiva histórica (séc. XVI-XVIII)” Instituto de História Moderna da FLUP.
- ARAÚJO, M. A., 2000 – “Depósitos de fácies continental e marinho na plataforma litoral da região do Porto: importância da tectónica na sua organização espacial”, Ciências da Terra (UNL), nº 14, Lisboa, p. 111-122.
- ARAÚJO, M. A., 2003 – “O litoral norte de Portugal e os depósitos cenozóicos da região do Porto: a tectónica e o eustatismo”, Actas de la II reunión de Geomorfología litoral, Universidade de Santiago de Compostela, 6 p.
- ARAÚJO, M. A.; GOMES, A.; CHAMINÉ, H. I.; FONSECA, P. E.; GAMA PEREIRA, L.C.; PINTO DE JESUS, A., 2003 – “Geomorfologia e geologia regional do sector de Porto-Espinho (W de Portugal): implicações morfoestruturais na cobertura sedimentar cenozóica”, Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe, nº 28, p. 79-105.
- ARNOLD, A., 1976 - Behavior of some soluble salts in stone deterioration. In Proceedings 2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones - Athnes, 1976, pp. 27-36.
- ARNOLD, A., 1984 - Determination of minerals salts from monuments. Studies in Conservation, vol. 29, pp. 129-138.
- ARNOLD, A., 1996 - Origin and behavior of some salts in context of weathering on monuments. In Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments - Bari, 1996, (ed. F. Zezza), Protection and Conservation of European Cultural heritage, Research Report nº 4, pp. 133-139.

- ARNOLD, A., KUENG, A., 1985 - Crystallization and habits of salt efflorescences on walls I -methods of investigation and habits. In Proceedings 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone-Lausanne 1985, pp. 255-267.
- ARNOLD, A., ZEHNDER, K., 1987 - Monitoring wall paintings affected by soluble salts. In Proceedings Symposium The Conservation of Wall Paintings-London 1987, (ed. Sharon Cather), Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, pp. 103-135.
- ARNOLD, A., ZEHNDER, K., 1988 - Decay of stony materials by salts on humid atmosphere. In Proceedings 6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone-Torun 1988, pp. 138-148.
- ARNOLD, A., ZEHNDER, K., 1989 - Salt weathering on monuments. In Proceedings 1st Symposium La Conservazione dei Monumenti nel Bacino dei Mediterraneo-Bari 1989, (ed. Fulvio Zezza), Grafo, Brescia, pp. 31-58.
- ASSUNÇÃO, C. F. T., 1962. Rochas Graníticas do Minho e Douro. Novos elementos para o seu conhecimento. Mem. Serv. Geol. Portg., Nova Série, 10: 33-65.

B

- BARATA, J.M.P. – Contribuição para o estudo das rochas do Porto. Faculdade de Philosophia Natural. Coimbra, 1910.
- BAYNES, F.J. & DEARMAN, W.R., 1978, The microfabric of a chemically weathered granite. Bull. Int. Ass. Engng., Geol., 18, pp 90-100.
- BAYNES, F.J. & DEARMAN, W.R., 1978, The relationship between the microfabric and the engineering properties of weathered granite. Bull. Int. Ass. Engng. Geol., pp 191-197.
- BEGONHA, A., 1997 – Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios do Porto. Tese de doutoramento. Universidade do Minho, 393 pp.
- BEGONHA, A., 2000 – Estudo da Patologia da Pedra do Mosteiro de S. Miguel de Refojos em Cabeceiras de Basto, Porto, 73 pp.
- BEGONHA, A., 2001a – Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto, FEUP-Edições, Porto, 445 pp.
- BEGONHA, A., 2001b - Study of minerals of soluble salts of deteriorated stones in the Monastery of S. Miguel de Refojos by scanning electron microscopy. In Proceedings of 8^o Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials - Athens 2001, (eds. M. Stamatakis, B. Georgali, D. Fragoulis, E. Toubakari), Athens 2001, pp. 419 - 427.
- BEGONHA, A., 2002a – Igreja de S. João de Tarouca: Estudo da Deterioração da Pedra, Porto, 68 pp.
- BEGONHA, A., 2002b – Estudo da patologia da pedra da igreja de S. Pedro de Rates, Relatório no âmbito do Protocolo DGEMN-FEUP Estudo de Materiais Pétreos e Argamassas Porto 85 pp
- BEGONHA, A., 2002c – Igreja de S. Pedro de Rates. Estudo da Deterioração da Pedra. Livro de actas do Seminário "A Intervenção no Património; Práticas de Conservação e Reabilitação" FEUP/DGMEN, pp.309 - 332.
- BEGONHA, A., 2003a – Igreja de S. João Baptista, Matriz de Vila do Conde: Estudo da Deterioração e do Tratamento da Pedra, Relatório no âmbito do Protocolo DGEMN-FEUP Estudo de Materiais Pétreos e Argamassas, Porto, 74 pp.
- BEGONHA, A., 2003b – Igreja de Nossa Senhora da Ajuda, Matriz de Espinho: Estudo da Deterioração e do Tratamento da Pedra, Relatório no âmbito do Protocolo DGEMN-FEUP Estudo de Materiais Pétreos e Argamassas, Porto, 52 pp.
- BEGONHA, A., 2003c – Chafariz de Caminha: Estudo da deterioração e do Tratamento da Pedra Porto, 52 pp.
- BEGONHA, A., 2003d – Estudo da aplicação de consolidantes em pedras da Igreja de S Pedro de Rates. Relatório no âmbito do Protocolo DGEMN-FEUP Estudo de Materiais Pétreos e Argamassas, Porto, 66 pp.
- BEGONHA, A., 2003e – Faculdade de Engenharia do Porto: Estudo da origem do desenvolvimento de colonização biológica em placas de revestimento de granito. Relatório para a Reitoria da Universidade do Porto, 36 pp.

- BEGONHA, A., 2004a – Igreja de Nossa Senhora da Assunção, Matriz de Caminha: Estudo da deterioração da pedra – Diagnóstico e Tratamentos. Relatório para o IPPAR 79 pp
- BEGONHA, A., 2004b – Convento de São Gonçalo de Amarante: Estudo diagnóstico e proposta de tratamento da pedra. Relatório no âmbito do Protocolo DGEMN-FEUP Estudo de Materiais Pétreos e Argamassas, FEUP, Porto, 135 pp.
- BEGONHA, A., ALMEIDA, A., 2003 - The Faculty of Sciences in Oporto: deterioration of the granitic stones. In Proceedings IV Congresso Ibérico de Geoquímica e XIII Semana de Geoquímica, Coimbra, pp. 297-300.
- BEGONHA, A., ALMEIDA, A., OLIVEIRA, R., 2004 - Stone decay in the building of the Faculty of Sciences in Oporto. In Proceedings Natural and Cultural Landscapes: The Geological Foundation, Royal Irish Academy, Ed. Matthew Parkes, Dublin, pp.215-218.
- BEGONHA, A., SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1993 - Stone weathering and deterioration in a granitic monument. In Proceedings ISRM International Symposium on Safety and Environmental Issues in Rock Engineering Eurock'93 - Lisboa 1993 (ed Ribeiro e Sousa e Grossmann), Balkema, Rotterdam, pp. 267-274.
- BEGONHA, A., SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1995 - A meteorização do granito do Porto. IV Congresso Nacional de Geologia. Lab. Mun. Geol. Fac. Ciên U. Porto., Memórias, n° 4, pp.177-181.
- BEGONHA, A., SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1996a - Characterization of black crusts and thin black layers in granitic monuments: the role of air pollution. In Proceedings of the European Commission Workshop Degradation and Conservation of Granitic Rocks in Monuments-Santiago de Compostela 1994, (eds. M.A. Vicente, J. Delgado Rodrigues e J. Acevedo), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report N° 5, pp.121-126.
- BEGONHA, A., SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1996b - Black crusts and thin black layers in granitic monuments: their characterization and the role of air pollution. In Proceedings 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone-Berlin 1996, (ed. Josef Riederer), vol. 1, Berlin, pp. 371-375.
- BEGONHA, A., SEQUEIRA BRAGA, M.A., 2000 - Study of stone deterioration in the cloister of the Mosteiro de Grijó, Portugal, Proceedings 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, (ed. Vasco Fassina), vol. 2, venezia, pp. 689-696.
- BEGONHA, A., SEQUEIRA BRAGA, M.A., 2002 - Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. Catena, 49, pp. 57-76.
- BEGONHA, A., SEQUEIRA BRAGA, M.A., GOMES DA SILVA, F., 1995 - A ação da água da chuva na meteorização de monumentos graníticos. IV Congresso Nacional de Geologia. Lab. Mus. Geol. Fac. Ciên U. Porto., Memórias, n° 4, pp.177-181.
- BEGONHA, A., SEQUEIRA BRAGA, M.A., GOMES DA SILVA, F., 1996 - Rain water as a source of the soluble salts responsible for stone decay in the granitic monuments of Oporto and Braga - Portugal. In Proceedings 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone-Berlin 1996, (ed. Josef Riederer), vol. 1, Berlin, pp. 481-487.
- BEGONHA, A., TELES, M., 2000 - Study of stone deterioration in the Palácio do Freixo in Oporto, Proceedings 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, (ed. Vasco Fassina), vol. 2, Venezia, pp. 593-601.
- BORGES, F. S., 1984a. Dobras. In: Geologia Estrutural (Parte I). Faculdade de Ciências, Universidade do Porto. (Policopiado).
- BORGES, F. S., 1984b. Falhas. In: Geologia Estrutural (Parte I). Faculdade de Ciências, Universidade do Porto. (Policopiado).
- BORGES, F. S., NORONHA, F. & MARQUES, M., 1985. Excursão Geológica no Complexo Gnáissico da Foz do Douro. In: Livro-guia das excursões geológicas da IX Reunião de Geologia do Oeste Peninsular, Universidade do Porto.
- BORGES, F. S., NORONHA, F. & MARQUES, M., 1987. Metamorphic terrains of Foz do Douro. In: RIBEIRO, A., DIAS, R., PEREIRA, E., MERINO, H., BORGES, F. S., NORONHA, F. & MARQUES, M., COORDS, Guide-book for the Miranda do Douro-Porto Excursion. Conference on Deformation and Plate Tectonics, Oviedo, p. 11-19.

- BRANDI, C., 1977 - Teoria del restauro. Torino. Piccola Biblioteca Einaudi, 1963 (2ª ed. de 1977).
- BRAVO, M. S., ABRUNHOSA, M. J., 1978. Sobre a petrografia, composição e origem dos anfíbolitos da Foz do Douro (Porto-Portugal). Publ. Mus. Labor. Miner. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Porto, 4ª Sér., 95: 7-26.
- BRILHA, J. B. R., 1992 - Estudo da tipologia das alterações do leucogranito no jazigo de caulino de Campados (Espôsende): a meteorização responsável pela caulinização – Trabalho de Síntese, Universidade do Minho, Braga, 176 pp.
- BROOKS/COLE, 2001 – Publishing/ATP.
- C**
- CABRAL, J., 1986 – A neotectónica de Portugal - estado actual dos conhecimentos. Maleo, Bol. Soc. Geol. Portugal, 2, 14, 3-5.
- CABRAL, J., 1993 – Neotectónica de Portugal Continental. Dissertação de Doutoramento – Departamento de Geologia, Fac. Ciências Universidade, 435 p, Lisboa.
- CABRAL, J., 1995 – Neotectónica em Portugal Continental. Memórias do Instituto Geológico e Mineiro, 265p, nº 31, Lisboa.
- CABRAL, J. e Ribeiro, A., 1988 – Carta Neotectónica de Portugal Continental e respectiva notícia explicativa. Serviços Geológicos de Portugal.
- CAMUFFO, D., 1996 - The role of climate on stone weathering. In Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments - Bari, 1996, (ed. F. Zezza), Protection and Conservation of European Cultural heritage, Research Report nº 4, pp. 157-165.
- CANEVA, G., NUGARI, M. P., SALVADORI, O., 1991. Biology in the Conservation of Works of Art. ICCROM, Roma, 182p.
- CARBONARA, Giovanni, 1997. Avvicinamento al restauro. Teoria, storia, monumenti. Napoli: Liguori.
- CARTA GEOTÉCNICA DO PORTO, 2003 – Volume I – Notícia explicativa e cartas – Tomo I – Notícia Explicativa – Câmara Municipal do Porto. 225pp.
- CARTA MILITAR DE PORTUGAL À ESCALA 1:25 000, Folha 110. Instituto Cartográfico do Exército, 1998.
- CARTA DE RESTAURO DOS MONUMENTOS HISTÓRICOS, 1931 - Atenas - CIAM
- CARTA DE ATENAS, 1933 – Atenas
- CARTA INTERNACIONAL, SOBRE A CONSERVAÇÃO E RESTAURO DOS MONUMENTOS E DOS SÍTIOS, 1964 – Veneza ICCROM
- CARTA EUROPEIA DO PATRIMÓNIO ARQUITECTÓNICO, 1975 – Amesterdão COE
- CARTA PARA A CONSERVAÇÃO DE LUGARES COM SIGNIFICADO CULTURAL, 1979 (revisões em 1981, 1988, 1999) - Burra (Nova Zelândia) ICOMOS
- CARTA, INTERNACIONAL PARA A SALVAGUARDA DAS CIDADES HISTÓRICAS, 1987 – Washington ICOMOS
- CARVALHO, A.M.G., 1987 – Alteração das Rochas. Museu Lab. Min. Geol. Fac. Ciências Univ. Lisboa, 24 pp.
- CARRINGTON DA COSTA, J.; TEIXEIRA, C., 1957 - Notícia Explicativa da Folha 9-C-Porto. Carta Geológica de Portugal. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- CASAL PORTO, M., 1989 - Estudio de la alteración dei granito en los edificios de interés histórico de la provincia de La Coruna - Tese de doutoramento, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 273 pp.
- CHAMINE, H. G. I. O., 2000. Estratigrafia e Estrutura da Faixa Metamórfica de Espinho-Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena): Implicações Geodinâmicas. Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto. (Tese de Doutoramento).

- CHAMINÉ H. I., GOMES A., TEIXEIRA J., FONSECA, P. E., PINTO DE JESUS A., GAMA PEREIRA L. C., SOARES DE ANDRADE A., FERNANDES, J.P., MOÇO, L.P., FLORES, D., ARAUJO, M. A. & ROCHA F. T. (2004) – “Geologia, Geomorfologia e Estratigrafia dos domínios estruturais Carvoeiro-Caldas de S. Jorge e de Soutelo-Arrancada do Vouga (Faixa de cisalhamento de Porto-Coimbra-Tomar, NW de Portugal): Implicações tectonoestratigráficas”, Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe, Coruña, Vol. 29, p. 299-330.
- CHIODI, C. F. & RODRIGUES, E. P., 1997– Análise comparativa de mármore e granitos para revestimento em edificações. Rochas de Qualidade, São Paulo, n. 137, p. 70-86.
- COMMISSION RESEARCH WORKSHOP ORIGIN, 1996. Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments-Bari, (ed. F. Zezza), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report N.º 4, pp. 39-53.
- I CONGRESSO INTERNACIONAL DE ARQUITECTOS E TÉCNICOS DE MONUMENTOS HISTÓRICOS, 1957 – Paris
- CONVENÇÃO PARA A PROTECÇÃO DO PATRIMÓNIO MUNDIAL, CULTURAL E NATURAL, 1972 – Paris UNESCO
- CONVENÇÃO PARA A SALVAGUARDA DO PATRIMÓNIO ARQUITECTÓNICO DA EUROPA, 1985 – Granada – COE
- CONVENÇÃO EUROPEIA PARA A PROTECÇÃO DO PATRIMÓNIO ARQUEOLÓGICO, 1969 – Londres -COE
- COSTA, A., 2002a – Apresentação no Livro de actas do Seminário. In A Intervenção no Património; Práticas de Conservação e Reabilitação. FEUP/DGMEN, pp.V.
- COSTA, A., 2002b – Discursos Proferidos ns Sessões de Abertura e Encerramento. Livro de actas do Seminário In A Intervenção no Património; Práticas de Conservação e Reabilitação. FEUP/DGMEN, pp.XV – XXX.
- COSTA, J. C., TEIXEIRA, C., 1963 - Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Notícia Explicativa da folha 9C (Porto). Serviços Geológicos de Portugal, 38 pp.
- COSTA, P. P., ROSAS, L., 2001 - Leça do Balio. No Tempo dos cavaleiros do Hospital. Edições Inapa Coleção Portucale, 143 p.p.

D

- DELGADO RODRIGUES, J., 1989 - Causes, mechanisms and measurement of damage in stone monuments. Fourth Symposium Science Technology and European Cultural Heritage. Bologna, pp. 37-39.
- DELGADO RODRIGUES, J., 1993a - Conservation of Granitic Rocks With Application To Megalithic Monuments - Granitix. In European Cultural Heritage. Newsletter On Research, Vol. 7,n.º1,pp. 27-33.
- DELGADO RODRIGUES, J., 1993b – Incógnitas e problemas relativos à conservação de rochas graníticas e a sua abordagem nos projectos STEP. Alteracion de Granitos e Rocas Afines. Deterioro de Monumentos Históricos, (coord. M^a Angeles Hernández, Eloy Molina Ballesteros, Vicente Rives Arnau), pp. 67-73.
- DELGADO RODRIGUES, J., 1996 - Conclusions report - Project STEP-CT90-0110 – Conservation of granitic rocks with application to the megalithic monuments. In Proceedings of the European Commission Workshop Degradation and Conservation of Granitic Rocks in Monuments-Santiago de Compostela 1994, (eds. M.A. Vicente, J. Delgado Rodrigues e J. Acevedo), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report N.º 5, pp. 161-242.
- DELGADO RODRIGUES, J. COSTA, D., 1996 – Conservation of granitic rocks. LNEC, Lisboa, 101 pp.
- DELGADO RODRIGUES, J. MOURA, M.R.M., SOARES DA SILVA, J.C., 1994 – Limpeza da Torre dos Clérigos – estudos realizados e trabalhos executados. - Monumentos, N.º. 1, pp. 68-75.
- DIAS, J. A., e FERREIRA, Ó., 1997 – Gestão costeira e conhecimento científico: Uma perspectiva integrada. “Colectânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal”, p.131-149, Porto

DIAS, G., 1987 – Mineralogia e petrologia de granitos Hercínicos associados a mineralizações filonianas de Sn-W (Minho, Portugal) – Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, 304 pp.

DIAS, G., 2001 – Fontes de Granitóides Hercínicos da Zona Centro-Ibérica (Norte de Portugal): evidências isotópicas (Sr, Nd). Geoquímica e petrogénese de Rochas Granitóides. Memórias da Academia das Ciências de Lisboa, Tomo XXXIX, pp.121 – 143.

DIAS, FERREIRA & PEREIRA, 1994 – Estudo Sintético de Diagnóstico da Geomorfologia e da Dinâmica Sedimentar dos Troços Costeiros entre Espinho e Nazaré

F

FASSINA, V., 1996 - Neof ormation decay products on monumens surface due to marine spray and polluted atmosphere in relation to indoor and outdoor climate. In Proceedings of the European

FASSINA, V., ROSSETTI, M., 1994 Weathering of marble in relation to natural and anthropogenic agents on the Ca'd'Oro façade (Venice). In Proceedings 3^o Simpósio Internazionale La Conservazione dei Monumenti nel Bacino dei mediterraneo-Venezia, 1994 (eds. V. Fassina, H. Ott e F. Zezza), Venezia, pp. 825-834.

FASSINA, V., STEVAN, A.G., 1992 - Fogwater composition in Venice in relation to stone decay. In Proceedings 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone-Lisboa 1992, (eds. J. Delgado Rodrigues, Fernando Henriques e F. Teimo Jeremias), LNEC, vol. 1, Lisboa, pp. 365-374.

FASSINA, V.; MIGNUCCI, A.; NACCARI, A.; STEVAN, A.; CASSAR, J., TORPIANO, A., 1996a - Investigation on the moisture and salt migration in the wall masonry and on the presence of salt efflorescences on stone surface in the church of Sta. Marija Ta' Cwerra at Siggiewi, Malta. In Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments-Bari 1996, (ed. F. Zezza), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report N^o. 4, pp. 293-308.

FASSINA, V.; ARBIZZANI, R. e NACCARI, A., 1996b - Salt efflorescence on the marble slabs of S. Maria dei Miracoli church: a survey on their origin and on the methodology of their removal. In Proceedings 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone-Berlin 1996, (ed. Josef Riederer), vol. 1, Berlin, pp. 523-534.

FERREIRA, A. De Brum, 1978 – “Erosão diferencial e modelado das regiões graníticas do Norte de Portugal, Lisboa, Linha de Acção de Geografia Física, Relatório n^o7, CEG,88p.

FERREIRA, D. B., 1981 – Carte Géomorphologique du Portugal (1/500 000). Centro de Estudos Geográficos. Lisboa. Memória n^o6. Notícia Explicativa.

FERREIRA, N., IGLESIAS, M., NORONHA, F., PEREIRA, E., RIBEIRO, A., RIBEIRO, M.L. 1987 - Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In Geologia de los granitóides y rocas asociadas dei Macizo Hesperico. Eds. F. Bea, A. Carmina, J.C. Gonzalo, M.L. Plaza, J.M.D. Rodrigues, Editorial Rueda, Madrid, pp. 37-51.

FERREIRA, J.O., 2004 – Caracterização da Acção da Água em Edifícios de Pedra. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, 177 pp.

FERREIRA, J., ARAÚJO, M. A. & GOMES, A. A., 1995. Contribuição para o conhecimento geológico e geomorfológico da praia de Lavadores (Vila Nova de Gaia). In: BORGES, F. S. & MARQUES, M. M., Coords, IV Congresso Nacional de Geologia, Porto, 1998, Resumos Alargados. Mem. Mus. Labor. Miner. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Porto, 4: 411-415.

FERREIRA, A. B., 1999 – Investigação em geomorfologia. Perspectiva histórica e orientações actuais, in Encontros de Geomorfologia. Conferências, Universidade de Coimbra, p. 9-29.

FIGUEIREDO, N., DIAS, G., LETERRIER, J., NUNES, J.E.L., 1993 - Morphological analysis and quantification weathred surfaces: preliminary study. In Proceedings IV Congresso Nacional de Geologia-Porto, 1995, Universidade do Porto. Faculdade de

Ciências. Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Memórias N° 4, pp. 183-188.

FITZNER, B., 1990 - Mapping of natural stone monuments - documentation of lithotypes and weathering foris. In Proceedings Advanced Workshop Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones-Pavia 1990.

FITZNER, B. e HEINRICHS, K., 1991 - Weathering forms and rock characteristics of historical monuments carved from bedrocks in Petra, Jordan. In Proceedings European Symposium Science, Technology and European Heritage-Bologna 1989. Eds. N.S. Baer, C. Sabbioni e A.I. Sors, Commission of the European Communities, Butterworth - Heinemann, Oxford, pp. 908 -911.

FITZNER, B. e HEINRICHS, K., 1994 - Damage diagnosis at monuments carved from bedrocks in Petra, Jordan. In Proceedings 3º Simpósio Internazionale La Conservazione dei Monumenti nel Bacino dei Mediterraneo-Venezia 1994. Eds. V. Fassina, H. Ott e F. Zezza. Venezia, pp. 663 -671.

FITZNER, B., HEINRICHS, K. e KOWNATZKI, R., 1992 - Classification and mapping of weathering forms. In Proceedings 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone - Lisboa 1992. Eds. J. Delgado Rodrigues, Fernando Henriques e F. Teimo Jeremias, LNEC, vol. 2, pp. 957 - 968.

FITZNER, B.; HEINRICHS, K. e VOLKER, M., 1996 - Monument mapping - a contribution to monument preservation. In Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments-Bari 1996, (ed. F. Zezza), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report N°. 4, pp. 347-355.

G

GALOPIM DE CARVALHO, A. M., 1997. Geologia – petrogénese e orogénese, p. 97-104. Universidade Aberta. Lisboa.

GAJ, F.; GUGLIELMETTI, V.; GRASSO, P.; GIACOMIN, G., 2003 - "Experience on Porto: EPB follow-up". Tunnels & Tunnelling International, pp. 15-18.

GOLDICH, Samuel S., 1938. A study in rock weathering, Journal of Geology, 46 (1), p. 17-58.

GOUDIE, A.S. & VILES, H.A., 1997. Salt weathering hazards. Wiley.

H

HAWKSWORTH, D.L., 1990. The long-terms effects of air pollutants on lichen communities in Europe and North America. IN: Woodwell, G. M.(ed.). Patterns and processes of biotic impoverishment. Cambridge University Press, Cambridge, 1992. pág. 45-64.

HAMMECKER, C, 1993 - Importance des transferts d'eau dans la degradation des pierres en oeuvre - Tese de Doutoramento, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Strasbourg, 254 pp.

HENRIQUES F. A., "Replacement Mortars in Conservation: an Overview", Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, ICOMOS Sweden, 2004.

HENRIQUES F.A., "The Masonry of the Tower of Belém and its Repointing". Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 4, Jahrgang, Heft 6, 1998.

HENRIQUES, FERNANDO M. A., RODRIGUES, J. D., AIRES-BARROS, L., PROENÇA, N., 2005 – Materiais Pétreos e Similares – Terminologias das formas de alteração e degradação. In Patologias e Reabilitação das Construções 02. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNC). Lisboa.

I

ICOMOS,2004 – Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico. International Council on Monuments and Sites.

INSTITUTO DO AMBIENTE, 2003.

J

JESUS, M. E. R.VIEIRA DE, 2003 – Morfodinâmica do Cabedelo na Foz do rio Douro: perspectiva histórica e monitorização por GPS para o conhecimento da sua

evolução actual. Aplicabilidade pedagógica numa vertente CTSA. Tese de Mestrado, Universidade do Porto.

JULIVERT, M., FONTBOTÉ, J. M., RIBEIRO, A. & CONDE, L. E. N., 1974. Mapa Tectónico de la Península Ibérica Y Baleares, Escala 1:1000 000. Memoria Explicativa, 113 pp. Instituto Geologico Y Minero de España. Madrid.

JUNG, J. & BROUSSE, R., 1959. Classification modale des roches eruptives: utilisant les donnés fournies par le compteur de points. Paris: Masson. 122 p. il

K

KANDINSKY, W. – Ponto e Linha sobre Plano. Bauhaus, Alemanha, 1926

KLEMM, M., STIEGER, M., 2002 - A rapid method for the determination of cation exchange capacities of sandstones: preliminary data. In Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society. London. N° 205, pp.419- 429.

KOCH, A., SIEGESMUND, S., 2002 - Bowing of marble panéis: on-site damage analysis from the Oeconomicum Building at Gottingen (Germany). In Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society. London. N° 205, pp. 299-314.

KÖPPEN, W., 1932 – Die Klimagebiete nach KÖPPENS Klassifikation. Berlin.

KUNHEL, K.A., 2003 - Causes and consequence: volume changes behind building material deterioration. In: Proceedings of the 9th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials. Broekmans, M.A.T.M., Jensen, V. e Brattli, B. (eds.). Trondheim, 12 pp.

L

LAMENTI, G., TOMASELLI, L., TIANO, P., 2003. Cyanobacteria and biodeterioration of monumental stones. Molecular Biology and Cultural Heritage, Saiz-Jimenez (ed), Swets & Zeitlinger, 73-77.

LE ROY LADURIE, E. - Histoire du climat depuis l'an mil. Diexieme volume. Flammarion, 1983.

LEFEBRE, R.A., AUSSET, P., 2002 - Atmospheric pollution and building materials: stone and glass, pp. 329-345.

LEITE, M.R., MACHADO, 1999 – Recursos Minerais – Fonte de Riqueza ou Oportunidade Perdida? In Geonovas, n°13, 38 pp.

LETERRIER, J. & NORONHA, F., 1998. Evidências de um plutonismo calcoalcalino Cadomiano e de um magmatismo tipo MORB no Complexo Metamórfico da Foz do Douro (Porto). In: Azerêdo, A., Coord, Actas do V Congresso Nacional de Geologia (Resumos alargados), Lisboa, 1998. Comun. Inst. Geol. Min./Soc. Geol. Portugal, 84, 1: B146-B149.

LNEC, 1990 - Parecer sobre o estado de conservação da platibanda e dos pináculos do Mosteiro de Santa Clara, em Vila do Conde - Relatório 217/90 - NP, Lisboa, 14 pp.

LNEC, 1991a - Estudo relativo à alteração e à conservação do granito da Torre dos Clérigos, no Porto - Relatório 70/91 - GERO/NQ, Lisboa, 18 pp.

LNEC, 1991b - Estudo relativo à acção dos pombos sobre a pedra das igrejas do Carmo e dos Carmelitas, no Porto, e de São Gonçalo, em Amarante - Relatório 44/91 GERO/NQ, Lisboa, 27 pp.

M

MANN, M. et al., 1999. Northern hemisphere temperatures during the past millenium inferences, uncertainties, and limitations. Geophysical Research Letters, 26, 7459

MARQUES, Joana, 2008 – Líquenes – Ribeiro de S. Pedro de Moel. Centro de Investigação em Biodiversidade e Recursos Genéticos – CIBIO/ICETA e Departamento de Botânica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Publicado pela Vertigem – Associação para a Promoção do Património.

MARQUES, M., FLORES, D., PINTO DE JESUS, A. & GUERNER DIAS, A., Coords, 1994. Geologia dos Arredores do Porto. In: Livro-guia da excursão geológica do XIV Curso de Actualização de Professores de Geociências, p. 1-10. Braga.

- MARQUES, M., NORONHA, F., FLORES, D. & RODRIGUES, B., 2000. Geologia da faixa costeira Lavadores-Porto. In: Livro-guia da excursão geológica do XX Curso de Atualização de Professores de Geociências, Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto/Associação Portuguesa de Geólogos, Porto.
- MATIAS, J.M.S., ALVES, C.A.S, 2002 - The influence of petrographic, architectural and environmental factors in decay patterns and durability of granitic stones in Braga monuments (IW Portugal). In Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society. London. N° 205, pp.273- 281.
- MORNER, N. A., 1993 – Global Change: The last millennia, global and planetary changes. Elsevier Pub. Amsterdam.
- MOUTINHO DA SILVA, A. M., 2005 – Estudo da deterioração da pedra da Igreja de Santa Maria de Leça do Mosteiro de Leça do Balio – contributo para o ensino das geociências. Tese de Mestrado, Universidade do Porto.
- N**
- NAGY K.L., 1995 - Dissolution and precipitation kinetics of sheet silicates. Mineralogical Society of America, reviews in Mineralogy, Vol. 31, pp. 173 - 233.
- NASCIMENTO, Ú, 1970 – O Problema da alterabilidade das rochas em Engenharia Civil Fomento Técnica e Economia Ultramarinas, Vol. 8, n°2, pp. 135-155.
- NETO J. L. SANT'ANNA, 2007 – Aquecimento Global: debatendo e polemizando o clima em tempos de incerteza. Universidade Estadual Paulista. Brasil
- NIEBOER, E.; AHMED, H. M.; PUCKETT, K. J.; RICHARDSON, D. H. S., 1972. The heavy metal content of lichens in relation to distance from a nickel smelter in Sudbury. Ontario Lichenologist, 5: 292-304.
- NORD, A. G. & ERICSSON, T., 1993 – « Chemical analyses of black layers on building stone » - Studies in Conservation, vol. 38, n.º 1, pp. 25-35.
- NORD, A. G. & TRONNER, K., 1991 – “Stone weathering – air pollution effects evidence by chemical analyses” – Konserverings Tekniska Studier RIK 4, Rikantikvarieambtet och Statens Historiska Muser, Stockholm, 80 pp.
- NORD, A. G. & TRONNER, K., 1992 – “Characterization of thin black layers » in Proceedins 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone – Lisboa 1992. (eds. J. Delgado Rodrigues, Fernando Henriques e F. Telmo Jeremias), LNEC, vol. 3, Lisboa, pp. 217-237.
- NORONHA, F.; RAMOS, J.M.F.; REBELO, J. A.; RIBEIRO, A. e RIBEIRO, M.L., 1979 - Essai de corrélation des phases de déformation Hercynienne dans le Nord-Ouest Péninsulaire -Boletim da Sociedade Geológica de Portugal, vol. XXI, fase. II – III, pp. 227-237.
- NORONHA, F., 1994. Geologia e Tectónica. In: Carta Geotécnica do Porto. Vol. 1, Tomo 1 – Memória, p. 36-49. Câmara Municipal do Porto, COBA, FCUP.
- NORONHA, F., 2000. Enquadramento geológico da região do Porto. In: XX Curso de Atualização de Professores de Geociências, Porto, 2000, p.1-4. Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto/Associação Portuguesa de Geólogos, Porto.
- NORONHA, F. & LETERRIER, J., 1995. Complexo Metamórfico da Foz do Douro. Geoquímica e geocronologia. Resultados preliminares. In: BORGES, F. S. & MARQUES, M. M., Coords, IV Congresso Nacional de Geologia, Porto, 1998, Resumos Alargados. Mem. Mus. Labor. Miner. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Porto, n°4:p 769-774.
- NORONHA, F., RAMOS, J. M., REBELO, J. A., RIBEIRO, A. & RIBEIRO, M. L., 1979. Essai de corrélation des phases de déformation hercynienne dans le Nord-Ouest Péninsulaire. Bol. Soc. Geol. Portg., 21, 2/3: 227-237.
- NORONHA, F., 2005 – Carta Geotécnica do Porto – Geologia, tectónica, geomorfologia e sismicidade da Cidade do Porto – Workshop da Associação Portuguesa de Geólogos, A.P.G. – Porto – Maio.

O

- OLIVEIRA, R.M.C., 2001 – Deterioração de Monumentos Graníticos: O Caso da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Abordagem didáctica. Dissertação de Mestrado, F.C.U.P., 191 pp.

OLIVEIRA, César, SANTOS, Patrícia, NUNES, Teresa, PIQ, Casimiro, CASEIRO, Alexandre, e Peter WAHLIN, 2004 - CONTRIBUIÇÃO DAS EMISSÕES RODOVIÁRIAS NA QUALIDADE DO AR DA CIDADE DO PORTO

ONDRASSINA, J., KIRCHNER, D., SIEGESMUND, S., 2002 - Freeze-thaw cycles and their influence on marble deterioration: A long-term experiment. In Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society. London. N° 205, pp.9-18.

P

PEREIRA, E. (coord.), 1989 - Carta Geológica de Portugal na escala 1:200 000. Folha 1. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.

PEREIRA, E. (coord.), 1992 - Carta Geológica de Portugal na escala 1:200 000. Notícia explicativa da Folha 1. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa, 83 pp.

PEREIRA, M. F. C. C., 1999. Caracterização da Estrutura dos Domínios Setentrionais da Zona de Ossa-Morena e seu Limite com a Zona Centro-Ibérica, no Nordeste Alentejano. Departamento de Geociências, Universidade de Evora, p. 25-26. (Tese de Doutoramento).

PINTO, A.P.F., 1993 - Conservação de pedras graníticas - estudo da acção de hidrófugos - Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 345 pp.

PILEGAARD, K., 1976. Airborne metals and SO_2 monitored by epiphytic lichens in the industrial area. Environ. Pollut. 17:81-91.

R

RECOMENDAÇÕES PARA A SALVAGUARDA DA BELEZA E CARÁCTER DAS PAISAGENS E SÍTIOS, 1962 - Paris - UNESCO

RIBEIRO, A., ANTUNES, M. T., FERREIRA, M. P., ROCHA, R. B., SOARES, A. F., ZBYSZEWSKI, G., MOITINHO DE ALMEIDA, F., CARVALHO, D. & MONTEIRO, J. H., 1979. Introduction à la géologie générale du Portugal, p. 1-45. Serviços Geológicos de Portugal.

RIBEIRO, A., PEREIRA, E. & SEVERO, L., 1980. Análise da deformação da zona de cisalhamento Porto-Tomar na transversal de Oliveira de Azeméis. Comun. Serv. Geol. Port., 66:3-9. 26 Geologia no Verão 2002 - Viagem ao Património Geológico da Faixa Litoral da Cidade do Porto.

RIBEIRO, A.; QUESADA, C.; DALLMEYER, R.D. - "Geodynamic evolution of the Iberian Massif", in: R.D. Dallmeyer & E. Martínez-García (eds.) Pre-Mesozoic Geology of Iberia, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 1990, pp. 397-410.

RODRIGUES, B. & BRAVO, M., 1983 - Interpretação de diagramas de fases de interesse geológico. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

ROSAS DA SILVA, D.J., 1936 - Granitos do Porto. Provas de Agregação, Porto..

S

SHARPE, D. - "On the Geology of the neighbourhood of Oporto, including the Silurian coal and slates of Vallongo". Quart. Journ. Geol. Soc. London Proceedings, 5, 1849, pp. 142-153.

SEAWARD, M. R. D. Lichens in air-polluted environments: multivariate analysis of the factors involved. IN: Proceedings of the Kuopio Meeting on Plant Damages Caused by Air Pollution. Kuopio, 1977. 57-63 p.

SEAWARD, M. R. D. Lichen Ecology. Academic Press, Inc. London, 1993. 550 p.

SEAWARD, M.R.D. Lichens and sulphur dioxide air pollution: field studies. Environ. Ver., 1993. 1:73-91.

SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1988 - Arenas e depósitos associados da bacia de drenagem do rio Cávado (Portugal). Contribuição para o estudo da arenização - Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, 325 pp.

SEQUEIRA BRAGA, M.A., PAQUET, H., 1986 - Gibbsite as a biotite weathering product in a granitic saprolite from Cávado river basin, Northwest Portugal. In Proceedings International Meeting Geochemistry of the Earth Surface and Processes of Mineral Formation-Granada, 1986. Eds. R. Rodríguez-Clemente e Y. Tardy, C.S.I.C, Madrid, pp. 175 - 186.

- SEQUEIRA BRAGA, M.A., PAQUET, H., 1987 - Gibbsite as a biotite weathering product in a granitic saprolite from Cávado river basin, Northwest Portugal. In *Proceedings International Meeting Geochemistry of the Earth Surface and Processes of Mineral Formation-Granada 1986*, (eds. R. Rodríguez-Clemente e Y. Tardy), C.S.I.C., Madrid, pp. 175-186.
- SEQUEIRA BRAGA, M.A., ALVES, A., BEGONHA, A., 1993 – Meteorização do granito do Porto e degradação do edifício do Hospital de Santo António: monumento histórico construído com materiais graníticos. In *Alteration de Granitos y rocas afines - Proceedings Workshop Alteración de Granitos y rocas afines, empleados como materiales de construcción - Ávila 1991* (ed. Vicente Hernández, Molina Ballesteros e Rives Arnau), C.S.I.C., Madrid, pp. 153-154.
- SEQUEIRA BRAGA, M.A., ALVES, A., BEGONHA, A., GOMES DA SILVA, F., 1996 -Industrial and urban pollution impact in Portuguese monuments: comparative study between two regions. In *Proceedings of the European Commission Workshop Degradation and Conservation of granitic Rocks in Monuments- Santiago de Compostela 1994* (ed. M.A. Vicente, J. Delgado Rodrigues e J. Acevedo), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report, n° 5, pp. 127-132.
- SEQUEIRA BRAGA, M.A., PAQUET, H., BEGONHA, A., 2002 - Weathering of granites in a temperate climate (KW Portugal): granitic saprolites and arenization. In *Catena*, 41-56 pp.
- SIEGESMUND, S., WEISS, T., VOLLBRECHT, A., 2002 - Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and cases studies: introduction. In *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies Geological Society. London. N° 205*, pp.1-7.
- SILVA, Z.C. & SIMAO, J.A.R.S., 1995 - Alteração progressiva em rochas silicatadas. Ensaio em anortositos. In *Proceedings IV Congresso Nacional de Geologia, Porto 1995* (coord. F. Sodré Borges e M.M. Marques), Universidade do Porto - Faculdade de Ciências, Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Memórias n° 4, pp. 209-210.
- SILVA, Armando Coelho da - "As Origens do Porto" In RAMOS, Luís A. de Oliveira (dir.) - *História do Porto. 3ª Edição. Porto: Porto Editora, 2000*, p. 45-117
- SIMÃO, J., 2003 - Rochas ígneas como pedra ornamental - Causas, condicionantes e mecanismos de alteração. Implicações tecnológicas. Dissertação para obtenção do grau de Doutor. Universidade Nova de Lisboa, 182 pp.
- STEFÁNSSON, A., GÍSLASON, S.R., ARNÓRSSON, S., 2001 - Dissolution of primary minerals in natural waters II. Mineral saturation state. *Chemical Geology*, Vol.172. pp.251-276.
- STROHMEYER, D., SIEGESMUND, S., 2002 - Anisotropic technical properties. In *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society. London. N° 205*, pp.115- 135.
- SUGUIO, K. 1980. Rochas Sedimentares (Propriedades, Gênese e Importância Econômica)., São Paulo:Editora Edgard Blücher Ltda. and Editora da USP, 500 p.
- T**
- TABORDA J P, ALCOFORADO M J, GARCIA J C (2004) O Clima do Sul de Portugal no século XVIII. Reconstituição a partir de fontes descritivas e instrumentais. Area de Investigação de Geo-Ecologia, Relatório n.º 2, Centro de Estudos Geográficos, Lisboa: 214 p.86
- TEIXEIRA, C., 1970. Aspectos geológicos da orla litoral do Porto e de V. N. Gaia. *Naturalia*, 10, 1: 13-29.
- TELES, M., BEGONHA, A., 1998 – Patologia da Pedra. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 63 pp.
- TELES, M., BEGONHA, A., 1999 – Parecer sobre o estado de conservação da pedra do Palácio do Freixo, Porto, 39 pp.
- TIANO, P., 1998. Biodeterioration of monumental rocks: decay mechanisms and control methods. *Science and Technology for Cultural Heritage* 7, 19-38.
- TIANO, P., PARDINI, C., 2004. Valutazione in situ dei trattamenti protettivi per il materiale lapideo. Proposta di una nuova semplice metodologia. *Arkos* 5, gennaio/marzo, CNR ICVBC, Firenze, pp. 30-36.

TOMASELLI, L., LAMENTI, G., BOSCO, M., TIANO, P., 2000. Biodiversity of photosynthetic microorganisms dwelling on stone monuments. *International Biodeterioration and Biodegradation* 46, 251-258.

TORFS, K.; VAN GRIEKEN, R. e CASSAR, J., 1996 - Environmental effects on deterioration of monuments: case study of the church of Sta. Manja Ta' Cwerri, Malta. In *Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments-Bari 1996*, (ed. F. Zezza), Protection and Conservation of European Cultural Heritage Research Report N°. 4, pp. 443-451.

V

VEIGA, M. Rosário, 2003 – As argamassas na conservação. In *Actas das 1ªs Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções existentes*. Aveiro. Conferência convidada. Coleção Comunicações, COM 103, LNEC, Lisboa.

VEIGA, M. Rosário; AGUIAR, José; CARVALHO, Fernanda; SILVA, António Santos; SILVA, Córias, 2001. Metodologias para caracterização e conservação de argamassas de revestimento de edifícios antigos. Relatório Final do Projecto Old Renders. Lisboa, LNEC.

VIEIRA DA SILVA, J. C. B., 2001. Complexo Metamórfico da Foz do Douro: Contributos Científico-Didácticos. Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto. (Tese de Mestrado).

VILES, H.A. 1997. Urban air pollution and the deterioration of buildings and monuments. In: BRUNE, D., CHAPMAN, D.V., GRUYNNE, M.D., PACYNA, J.M. (ed.) 1997. *The global environment: science, technology and management*. Scandinavian Science Publ.; Weinheim; VCH: Germany. p. 599-609.

W

WARSCHEID, T. & BRAAMS, J. - Biodeterioration of stone: a review. 2000

WEBER, J., 1993 - Salt-induced deterioration of romanesque wall paintings in the church of St.Georgen, Styria, Austria. In *Proceedings International Workshop Conservation of Architectural Surfaces: Stones and Wall Covering-Venezia 1992*, (eds. G. Biscontin e L. Graziano), Il Cardo.

WEBER, J.; LEITNER, H.; GAGGL, W. e SZAMBELAN, R., 1996 - Crystallization of sulphate salts induced by selective salt extraction by poultices: results from a case study. In *Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments-Bari 1996*, (ed. F. Zezza), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report N°. 4, pp. 169- 179.

WHITE, A. F., BRANTLEY, S., 1995 - Chemical weathering rates of silicates/minerals: an overview. In *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, Vol. 31, pp. 1-22.

WIELAND, E.; WEHRLI, B., STUMM, W., 1988 - The coordination chemistry of weathering III. A generalization on the dissolution rates of minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 52, pp. 1969-1981.

Z

ZEHNDER, K., 1979 - Weathering of molasses sandstones on monuments and natural outcrops. In *Proceedings 3rd International Congress on the Deterioration and Preservation of Stone –Venezia*, pp. 91-105.

ZEHNDER, K., ARNOLD, A., 1989 - Crystal growth in salt efflorescence. *Journal of Crystal Growth*, 97, Amsterdam, pp. 513-521.

ZEZZA, F.; TORFS, K.; VAN GRIEKEN, R.; GARCIA PASCUA, N. e MACRI, E., 1996 - Study of environmental effects on deterioration of monuments: case study the Cathedral of Bari, Italy. In *Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments-Bari 1996*, (ed. F. Zezza), Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report N°. 4, pp. 461-471.

ANEXO – CD-ROM

ÍNDICE CD-ROM

Tese_Dissertação_MGRG_José Manuel Vilela Lobo.pdf

Livro_de_Campo.pdf

CEMUP

RAMAN

DRX

Fotografias

Arquitectura do Farol S. Miguel-o-Anjo

Sondagens Arqueológicas

DIAGNÓSTICO DA DETERIORAÇÃO DO GRANITO NO FAROL DE SÃO MIGUEL-O-ANJO (FOZ DO DOURO - PORTO) E MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO

José Manuel Vilela Lobo

José Manuel Vilela Lobo
David Angel, C. de Almeida



ANEXO – CD-ROM

Tese submetida à Faculdade de Ciências da
Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre
em Geomateriais e Recursos Geológicos

DEZEMBRO 2008